

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE PROCESU TAŽENÍ DRÁTU

OPTIMIZATION OF THE WIRE DRAWING PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Kabilka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. David Kabilka**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace procesu tažení drátu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o analýzu procesu tažení drátu v aplikaci pro automobilový průmysl s cílem optimalizovat kvalitu výsledného taženého drátu. Při řešení se rovněž předpokládá možné využití numerické simulace metodou konečných prvků.

Cíle diplomové práce:

- analýza současného stavu,
- obecný popis běžně používaných metod a způsobů tažení drátů,
- stanovení potenciálních rizik a definice limitních procesních podmínek při zavádění polotovaru do tažného nástroje,
- praktické ověření výsledků v praxi.

Seznam doporučené literatury:

ASM INTERNATIONAL. Metals handbook volume 14: Forming and forging. 9. vyd. Metals Park, Ohio:

American Society for Metals, 1988. ISBN 978-0-871-70020-9.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno:

Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge:

Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

LEE, Huei-Huang. Finite element simulations with ANSYS workbench 14: theory, applications, case studies. Mission: SDC Publications, 2012, 602 s. ISBN 978-1-58503-725-4.

MARCINIAK, Zdislaw, J. L. DUNCAN a S. J. HU. Mechanics of Sheet Metal Forming. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07-506-5300-00.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Kabilka David: Optimalizace procesu tažení drátu.

Práce řeší studii, rozbor a zhodnocení současného stavu a návrh úpravy technologie nebo parametrů zavádění drátu do tažného zařízení. Problém spočívá v zavádění drátu o průměru 14 mm z materiálu CK 67 do tažné stolice Schumag. Při zavádění drátu do tažné stolice se dvěma průvlakem dochází ke vzpěru drátu a napěchování mezi průvlakem a zaváděcím zařízením. Pro zavádění drátu jsou používány hydraulické zavádějící kleštiny, které jsou ovládány poloautomaticky. Na základě literární studie, výpočtu, simulace a praktického experimentu byly zjištěny podmínky, za kterých je možné stávající metodu zavádění drátu používat.

Klíčová slova: tažné zařízení, průvlak, simulace, experiment, Ansys

ABSTRACT

KABILKA David: Optimization of the Wire Drawing Process.

The aim of work is to present and analyse assessment of the current state and at the same time the proposal of adjustments to the technology or parameters, the introduction of the wire into the drawing machine. The problem arises when the introduction of wire with a diameter of 14 mm from the material CK 67 to the drawbenches Schumag. If we introduce the wire into the drawing machines with two primary beams leads to a buckling of the wire and pack between the drawing die and the boot device. For the introduction of wire are used hydraulic boot collets, which are controlled semi-automatically. In connection with professional studies and on the basis of the calculation, simulation and practical experiment have been identified the conditions allowing the current method of deployment of wire to use.

Keywords: drawing device, drawing die, simulation, experiment, Ansys

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KABILKA, David. *Optimalizace procesu tažení drátu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117152>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V dne 22.5.2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu nejen při psaní této práce, ale po dobu mého celého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ	11
1.1 Návrhy řešení problému	12
2 TECHNOLOGIE TAŽENÍ DRÁTU	13
2.1 Teorie tažení drátu	14
2.2 Rozložení napětí a deformace	15
2.3 Síla a práce při tažení	17
2.4 Změna teploty drátu při tažení	19
2.5 Vliv geometrie průvlaku	20
2.6 Tažná rychlost	20
2.7 Tření a maziva	21
2.8 Způsoby tažení drátu	22
2.9 Odokujování ocelového drátu	23
2.10 Stroje pro tažení drátů	25
2.11 Pomocné vybavení	28
3 PRŮVLAKY	33
3.1 Průvlaky TKP	34
4 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ	37
4.1 Metoda konečných prvků	37
4.1.1 Tvar, velikost a počet prvků	37
4.2 Ansys	39
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	40
5.1 Zkoušky mechanických vlastností	42
5.1.1 Tahová zkouška	43
5.1.2 Pěchovací zkouška	44
5.2 Teoretický výpočet	46
5.3 Experimentální ověření	48
5.4 Experiment	50
5.5 Simulace	54
6 ZÁVĚRY	61
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratek	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam výkresů	

ÚVOD [1],[2],[3],[4],[5],[6],[7]

Mezi výrobní technologie se řadí mimo jiné také technologie tváření. Tvářením kovů se rozumí výrobní technologický proces, při kterém dochází k žádoucí změně tvaru výrobku nebo polotovaru, případně jeho vlastností, v důsledku působení vnějších sil bez odběru třísek. Hlavní podstata tváření je vznik plastických deformací, ke kterým dojde v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu pro daný materiál. Tento děj je provázen fyzikálními změnami a změnami struktury materiálu, což ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti. Dělí se na dvě základní oblasti, a to na plošné tváření a objemové tváření.

Objemové tváření je proces, při kterém dochází k přetvoření polotovaru ve všech směrech objemu. Výhody objemového tváření jsou minimální odpad, rozměrová přesnost a vysoká produktivita. K základním metodám objemového tváření patří např. válcování, kování, protlačování a také tažení.

Tažením se v oblasti objemového tváření zpracovávají nejčastěji polotovary ve formě tyčí a drátů kruhového průřezu. Principem tažení je protahování polotovaru otvorem (průvlakem), při kterém se zmenšuje příčný průřez a zvětšuje délka. Tímto procesem se dosahuje velmi přesných rozměrů a tvarů, zlepšuje se také jakost povrchu a mechanické vlastnosti.

Technologie tažení drátů a tyčí nachází v dnešní době uplatnění mj. v automobilovém průmyslu. Pomocí této technologie jsou vyráběny díly, jako vinuté pružiny, lana, dráty, viz obr. 1, kabely elektroinstalace, stabilizátory podvozku, součásti pneumatik atd.



a) vinutá pružina



b) lano



c) drát

Obr. 1 Produkty tažení drátu [28]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [26], [30]

Problematika, které se práce věnuje, spočívá v optimalizaci tažného procesu, a to konkrétně v optimalizaci zavádění tažného drátu do tažného zařízení od výrobce Schumag, viz obr. 2. Zadání práce spočívá v optimalizaci tažného procesu, a to konkrétně v problematice zavádění tažného drátu do tažného zařízení od výrobce Schumag. Stávající technologie používá k tažení drátu jeden průvlak a tato technologie má být nahrazena technologií tažení přes dvojitý průvlak z důvodu zajištění lepší jakosti materiálu, především ovality a průhybu drátu.

Jedná se o drát, který je vyroben z materiálu Ck67. Mechanické vlastnosti materiálu Ck67 jsou dle normy: $R_m \geq 950 - 1100 \text{ N/mm}^2$; $Z \geq 30 \%$, 10 dní po válcování. Jeho chemické složení a zastoupení jednotlivých prvků v procentech je uvedeno v tabulce 1.



Obr. 2 Drátotah Schumag [30]

Tab. 1 Chemické složení materiálu Ck67 [26].

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
Ck67/C67S	0,65-0,70	0,15-0,30	0,65-0,80	max. 0,015	max. 0,015	0,15-0,30	max. 0,04

Řešený problém spočívá v tom, že není možné zavést tento drát o požadovaných průměrech do tažného zařízení, pro dva průvlaky. Zařízení Schumag je pro účely zavádění tažného drátu vybaveno poloautomatickou zaváděcí jednotkou, která funguje na principu dopředného protlačování drátu bez úpravy konce drátu. Tato jednotka tlačí drát do nástroje (průvlaku) za pomoci zaváděcích čelistí, viz obr. 3. Podávací čelisti mají rozsah pohybu od čela průvlaku 70 mm až 300 mm. Z tohoto důvodu dochází při zavádění drátu do dvojitého průvlaku k průhybu drátu. Při zavádění do jednoho průvlaku k průhybu nedochází. V dané firmě se výše uvedeným systémem řeší výroba drátů o průměrech 11,95 mm z polotovaru 13 mm a dále průměr 10,95 mm, který je vyráběn protahováním drátu o počátečním průměru 12 mm. Změna průměru drátu při tažení přes jeden průvlak je totožná jako při tažení přes dvojitý průvlak.



Obr. 3 Zaváděcí čelisti

1.1 Návrhy řešení problému

Výše popsané problémy lze řešit několika možnými variantami.

- Zařazení hrotovacího zařízení viz obr. 4. do tažné linky. Toto zařízení zabezpečí zúžení konce drátu, tudíž by bylo zavedení drátů přes dvojitý průvlak k tažným čelistem bezproblémový. Mezi nejběžnější hrotovací zařízení patří hrotovačky válcové. Jsou to dva válce z kalené oceli, ve kterých jsou půlkruhovitě drážky různého průměru, postavené tak, aby stejné poloměry stály proti sobě. Jelikož je pohyb válců nepřetržitý, drážky ve válci se rozšiřují a zase zužují, aby se drát snáze mezi válce vtáhl a úběr byl postupný.
- Další teoretická varianta řešení by byla úprava konstrukce nástroje pro zavádění drátu do průvlaků. Přípravek pro uložení průvlaků by musel být zkonstruován tak, aby se čelo prvního průvlaků přiblížilo k zaváděcím čelistem na minimální možnou vzdálenost.
- Třetí navržené řešení – úprava pojezdu zaváděcích čelistí tak, aby vzdálenost mezi čelistmi a čelem průvlaků byla co nejmenší a tím pádem by nedošlo k průhybu zaváděného drátu.



Obr. 4 Hrotovací zařízení

Při zavedení hrotovacího zařízení by muselo dojít k částečné úpravě tažné linky a ke koupi hrotovacího zařízení, což by bylo velice nákladné. Pro řešení problému byla zvolena třetí varianta, protože je nejjednodušší a nejméně nákladná. Pro použití třetí varianty je zapotřebí zjistit, na jakou vzdálenost se musí čelisti přiblížit, aby bylo možné drát do průvlaků zavést. Z tohoto důvodu je práce v dalších částech zaměřena na teoretický rozbor technologie tažení, simulaci a experiment.

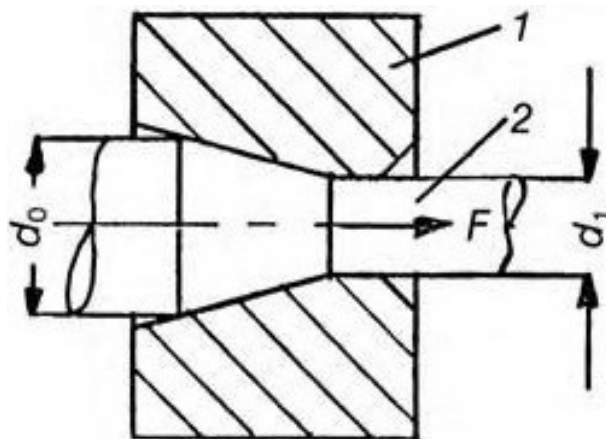
2 TECHNOLOGIE TAŽENÍ DRÁTU [1],[2],[3],[4],[5],[6],[7]

Drát je možné vyrobit téměř ze všech kovových materiálů, při čemž materiál drátu určuje způsob jeho použití. Technologie výroby taženého drátu je náročná a skládá se z více operací. Mezi tyto operace patří odokujňování povrchu válcovaného drátu od okují, jeho povrchové úpravy, vlastního tažení válcovaného drátu, tepelné zpracování a další povrchové úpravy taženého drátu. Tyto operace se často kombinují a opakují pro dosažení požadovaných parametrů a mechanických vlastností drátů. Možnost široké modifikace vlastností drátu umožňuje zabezpečit jeho optimální parametry.

Polotovary pro výrobu válcovaných drátů jsou sochory, které jsou vyráběny kontinuálním litím oceli nejčastěji s rozměry 150 x 150 mm a řezané na délku 12 m. Hmotnost sochory je přibližně 2000 kg. Povrch těchto sochorů je kontrolován a podle potřeby jsou upravovány převážně tryskáním, broušením nebo plamenem. Potom následuje ohřátí v peci na válcovací teplotu a válcování na kontidrátové trati na \varnothing 5,5 až 30 mm a stočení do svitku. Maximální rychlost válcování pro \varnothing 5,5 mm je $105 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tímto vznikne svitek drátu o hmotnosti zhruba 2000 kg. Součástí linky je řízené ochlazování vyválcovaného drátu, které zaručí, že vznikne struktura vhodná pro přímé tažení válcovaného drátu bez dalšího zpracování.

Vlastní technologie tažení drátu spočívá v protahování drátu kuželovým otvorem průvlatku působením tažné síly, viz obr. 5.

V kuželovém otvoru je tažený drát přetvářen, přičemž se jeho průměr zmenšuje a zvětšuje se jeho délka. Na drát působí tažné zařízení tažnou silou F , která táhne drát (2) přes průvlat (1) viz obr. 5. Na vstupu je drát s větším průměrem (d_0) a na výstupu vychází drát o menším průměru (d_1). V případě potřeby větších redukcí průměru drátu je použito více průvlatů. Těmito průvlaty drát prochází postupně, což je označováno za tzv. tandemové tažení. V místě tváření drátů dochází k působení tahu a tlaku a vzniká zde zbytkové napětí, které je možné odstranit následným tepelným zpracováním.



Obr. 5 Náskres tažného procesu [4]

Pro zavedení drátu do tažného zařízení je většinou zapotřebí upravit začátek taženého drátu, pro snadné zavedení do průvlatu tažného zařízení. Tato operace se provádí při pokojové teplotě lisováním, válcováním nebo u větších průměrů soustružením. Polotovar se za průvlatem upevní do tažných čelistí nebo se upne na navíjecí buben, přes který je následně drát navíjen. Součástí této jednotky je také mazací mechanismus, který zajišťuje mazání tažného procesu.

2.1 Teorie tažení drátu [1],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[16],[18]

Výroba taženého ocelového drátu za studena tažením silou F je určeno plastickou deformací, která vzniká průchodem drátu kuželovým otvorem (průvlakem). Během průchodu se mění délka drátu ve směru působení tažné síly a zmenšuje se plocha příčného průřezu taženého drátu při současném nárůstu pevnosti, meze pružnosti, tvrdosti a snižování jeho plastických vlastností. Zpevnění drátu, které je způsobeno tvářením, probíhá za takových teplot, během kterých zůstává zpevnění drátu zachováno.

Aby nedocházelo k trhání drátu během tažení, musí být na tažných zařízeních dodržen zákon rovnosti objemu drátu procházejících průvlaků za jednotku času:

$$S_0 \cdot L_0 = S_1 \cdot L_1 = S_2 \cdot L_2 = \dots = S_n \cdot L_n, \quad (2.1)$$

a také:

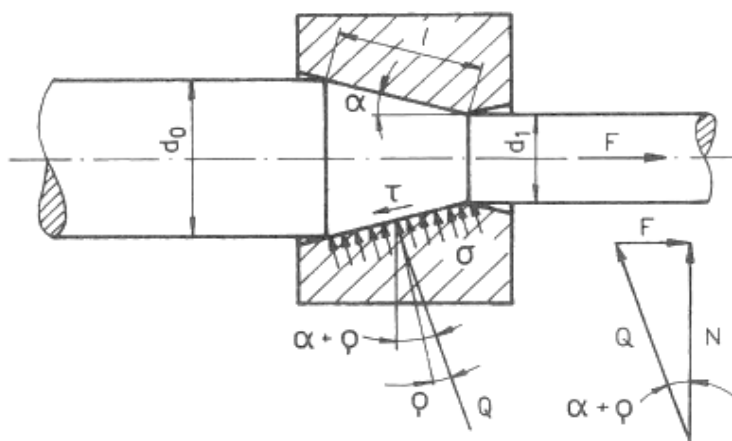
$$S_0 \cdot v_0 = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \dots = S_n \cdot v_n, \quad (2.2)$$

kde: $S_0, S_1, S_2 \dots S_n$ – průřezy drátu v jednotlivých průvlacích [mm^2],

$L_0, L_1, L_2 \dots L_n$ – délky drátu v jednotlivých průvlacích [mm],

$v_0, v_1, v_2 \dots v_n$ – rychlosti drátu v jednotlivých průvlacích [mm/s].

Při tažení způsobuje deformaci kuželová část průvlaku s vrcholovým úhlem „ 2α “, obr. 6. Na kuželovém povrchu průvlaku délky „ l “ působí v pásmu deformace příčná síla „ Q “, která je vyvolána působením vnější tahové síly „ F “. Příčná síla působí vlivem tažného úhlu kuželu a tření mezi povrchem drátu a pracovní částí průvlaku ve vztahu k vertikální složce síly „ N “ pod úhlem „ $\alpha + \rho$ “. Z trojúhelníku sil lze stanovit základní rovnici pro tahovou sílu:



Obr. 6 Průvlak – rozložení sil [8]

$$F = Q \cdot \sin(\alpha + \rho), \quad (2.3)$$

$$F = N \cdot \tan(\alpha + \rho), \quad (2.4)$$

kde: d_0, d_1 – vstupní a výstupní průměr [mm],

2α – úhel tažné části průvlaku [°],

F – tahová síla [N].

Protože se tažný úhel „ 2α “ vyskytuje nejčastěji v rozmezí od 10° do 20° a koeficient tření $\mu = \tan \rho$ nabývá při dobrém mazání hodnoty pod 0,05 ($\rho < 3^\circ$), příčná síla dosahuje velikost 4 až 7 násobku hodnoty tahové síly.

2.2 Rozložení napětí a deformace [1],[2],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11],[12]

Při tažení je nutná znalost stavů napjatosti v pásmu deformace při tažení v kuželovitém průvlaku. Jejich matematická analýza je významná jak pro výpočet tažných sil a tím i dimenzování tažných strojů, tak pro návrh a hodnocení technologického postupu.

Důsledkem geometrické povahy pochodu a tangenciálního napětí, způsobeného vnějším třením, dochází k tomu, že se směry hlavních os napjatosti rozcházejí s geometrickými osami pásma deformace. Proto je rozbor úlohy komplikovaný.

Tento fakt ovlivňuje především mechanickou podmínku plasticity při tažení, kterou nejde vyjádřit jednoduchými matematickými vztahy známými v základech plasticity.

Protože je v průvlaku vyvolán tříosý stav napjatosti s tlakovými napětími v příčném směru, jsou umožněny dostatečně velké deformace materiálu.

Všestranně radiální tlak je podmínkou pro dosažení požadovaných velkých plastických deformací a rozměrových změn drátu u produktů kruhového průřezu.

Avšak největší hlavní napětí je tahové napětí v podélném směru způsobené účinkem tažné síly. Tím ve schématu tříosé napjatosti převládá napětí v tahu, což omezuje velikost plastické deformace při jednom průchodu průvlakem. Další omezení způsobuje zpevňováním kovu při tažení za studena.

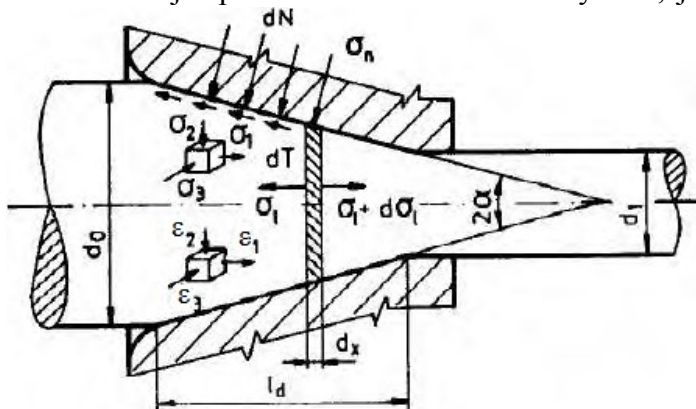
Pracovní části průvlaků pro tažení drátu mají zpravidla základní kuželovitý tvar, jak je znázorněno na obr. 7. Pro kalibrační funkci a úpravu přesných rozměrů u taženého výrobku slouží krátká válcovitá pracovní část.

Počáteční materiál o průměru d_0 se v důsledku působení tažné síly F protahuje průvlakem, jehož průměr d_1 stanovuje rozměr drátu po tažení.

Rozhodujícími činiteli pro celkový stav napjatosti v pásmu deformace jsou elementární normálová tlaková napětí dN a elementární třecí síly $dT = \mu dN$, které působí na kuželovitý povrch taženého drátu. Tyto síly, jsou rozhodující pro celkový stav napjatosti v pásmu deformace. Normálové tlaky a třecí síly ve válcovité části průvlaků jsou podstatně menší a nemají vliv na průběh deformace ve vlastním deformačním pásmu. Na jakýkoliv příčný element materiálu v pásmu deformace, který má nekonečně malou tloušťku d_x , působí na kuželovitém povrchu normálové napětí σ_n a tečné napětí $\tau = \mu \cdot \sigma_n$. V příčných řezech působí podélné tahové napětí σ_1 a $(\sigma_1 + d\sigma_1)$, které není v příčném průřezu rozděleno rovnoměrně. Další napětí působí v obvodovém směru a je to tlakové napětí σ_0 .

Tato tři hlavní napětí nám vyznačují tříosý stav napjatosti, a to v jakémkoliv bodě kuželovité části pásma deformace:

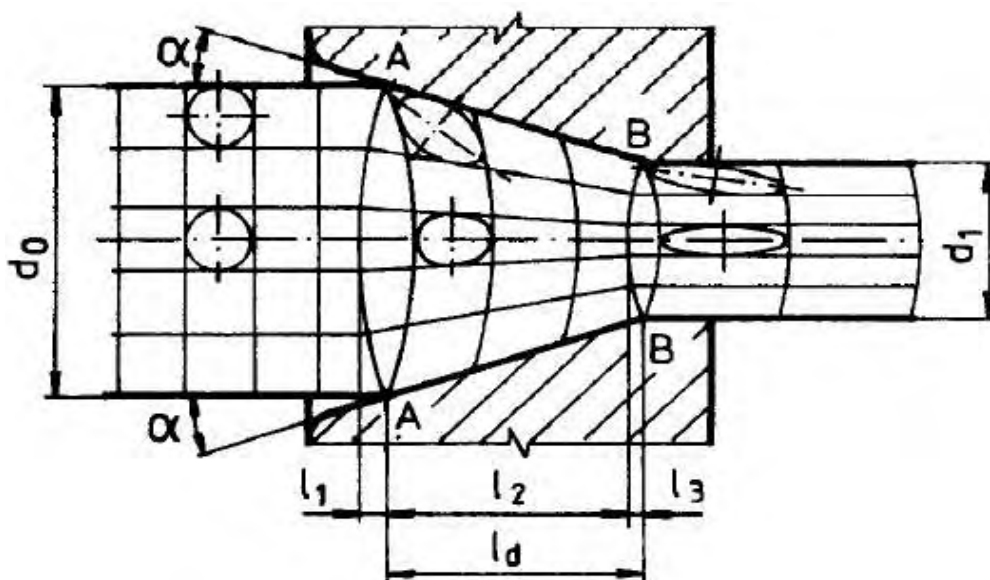
- absolutně největším tahovým napětím σ_1 , které působí v podélném směru,
- středním tlakovým napětím σ_2 , které působí v radiálním směru,
- absolutně nejmenším tlakovým napětím σ_3 , které působí v obvodovém směru.



Obr. 7 Podstata tažení v průvlaku [8]

Tomuto tříosému stavu napjatosti ($+\sigma_1; -\sigma_2; -\sigma_3$), odpovídá tříosý stav hlavních deformací: ($+\varepsilon_1; -\varepsilon_2; -\varepsilon_3$).

Intenzitu podélné deformace je možné zkoumat v podélných osových řezech na deformaci kružnic, které znázorňují elementární částice kovu, viz obr. 8. Původní čtvercová síť, do níž jsou kružnice vepsány, se deformuje tak, že tyto kružnice se protahují v elipsy a samotná síť se zakřivuje. Hlavní osy kružnic, původně rovnoběžně s osou tažení a kolmé k této ose, mění v průběhu tažení svůj sklon vzhledem k této ose, s výjimkou elementů, které leží v ose tažení.



Obr. 8 Intenzita deformace při tažení [11]

Zkosení původně čtvercových obrazců sítě a zakřivování jejich stran, jakož i znázorněné deformace zakreslených kružnic znázorňují fakt, že podélné deformace v jednotlivých příčných průřezech nejsou rozděleny rovnoměrně. Jedná se o nehomogenní podélné deformace. Proto je možné intenzitu deformace v kterémkoliv příčném průřezu pásma deformace vyjádřit formou diferenciálu této intenzity. Pro deformaci ve směru hlavních os elementárních elips (původně kružnic) platí pak následující vztah:

$$dS_\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{d\varepsilon_1^2 + d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_t^2}, \quad (2.5)$$

kde: $d\varepsilon_1$ – poměrná deformace ve směru prodlužování elementární částice [-],
 $d\varepsilon_r$ – poměrná deformace částice v radiálním směru [-],
 $d\varepsilon_t$ – poměrná deformace částice v tečném, tj. obvodovém směru [-].

Podle obr. 8 se pásmo deformace rozpadá na tři úseky:

Úsek v délce l_1 představuje část objemu drátu, který ještě nevstoupil do geometrického pásma deformace. Velikost a tvar tohoto úseku závisí na vstupním průměru d_0 , na úhlu taženého drátu „ 2α “, vnějším tření a na velikosti úběru průřezu, tedy také na průměru d_1 .

Úsek v délce l_2 , který představuje podstatnou část délky l_d . Zde nastává vlastní redukce průřezu drátu. Úsek l_1 tvoří plynulý přechod deformační rychlosti mezi průřezem, kde ještě deformace nenastává a průřezem, kde je deformaci vystaven celý průřez taženého drátu.

Na úsek l_3 , představující část objemu materiálu, který je v geometrickém pásmu deformace. Zde končí redukce průřezu taženého drátu a nastává vyrovnání rychlosti deformace v jednotlivých vláknech.

2.3 Síla a práce při tažení [1],[2],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11],[12],[13]

Ke stanovení vzorců pro výpočet tažné síly a práce jsou použity různé teorie procesu tažení, které lze rozdělit do pěti skupin:

- definování vzorců podle klasické elementární teorie plasticity,
- definování vzorců pomocí celkové deformační práce,
- odvození vzorců podle „přísnějších“ teorií (teorie skluzových čar, teorie vizkozitní plasticity, teorie postupného vyrovnání chyb, metoda elementárních fází),
- empirické postupy (empiricky získané výsledky jsou interpolovány pomocí matematických funkcí),
- hydrodynamická teorie tažení s využitím Navierových-Stokesových pohybových rovnic vazké tekutiny.

Napětí a tažná síla je nejčastěji určována v klasických teoriích tažení za pomoci přibližných diferenciálních rovnic rovnováhy napětí v bodě tvářeného objemu a z podmínek plasticity. Příkladem jsou vzorce podle Siebela, Pompa a Houdremonta.

Celková tažná síla je určena jako součet síly potřebné k deformaci tažného drátu F_d , síly nutné na překonání vnějšího tření F_t a síly pro překonání vnitřních ztrát posuvu materiálu F_z .

$$F_c = F_d + F_t + F_z \text{ [N]}, \quad (2.6)$$

$$F_d = S_1 \cdot R_{ms} \cdot \ln \frac{S_0}{S_1} \text{ [N]}, \quad (2.7)$$

$$F_t = S_1 \cdot R_{ms} \cdot \ln \frac{S_0 \mu}{S_1 \alpha} \text{ [N]}, \quad (2.8)$$

$$F_z = S_1 \cdot R_{ms} \cdot \frac{2}{3} \alpha \text{ [N]}. \quad (2.9)$$

S uvážením dosazení vztahů 2.7 až 2.9 do základního vzorce 2.6 lze po úpravě vyjádřit celkovou tažnou sílu jako:

$$F_c = S_1 \cdot R_{ms} \cdot \ln \frac{S_0}{S_1} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2\alpha}{3 \ln \frac{S_0}{S_1}} \right) \text{ [N]}, \quad (2.10)$$

kde: S_0, S_1 – průřezy vstupního a výstupního průměru drátu [mm^2],

R_{ms} – střední mez pevnosti drátu v tahu [MPa],

\ln – skutečná logaritmická deformace,

μ – koeficient tření [-],

α – polovina tažného úhlu v obloukové míře [rad].

Tažná síla nutná k deformaci materiálu F_d není ovlivněna velikostí tažného úhlu nástroje a je při všech velikostech totožná. Síla nezbytná k překonání tření v průvlaku F_t s rostoucím tažným úhlem klesá, protože se zmenšuje styková plocha mezi drátem a průvlakem. Síla k překonání vnitřních posuvů materiálu F_z se na rozdíl od síly potřebné k překonání tření v průvlakem s rostoucím tažným úhlem zvyšuje. Tažné síly F_t a F_z znázorňují ztráty. Zatímco F_t je ztráta vnější a F_z je ztráta vnitřní. Rozdíl jednotlivých složek na celkové síle F_c při běžně používaných rychlostech a správném nastavení mazání je následující: $F_d = 68 \%$, $F_t = 20 \%$, $F_z = 12 \%$.

Účinnost přetvárné síly při tažení je vyjádřena podílem deformační síly a celkové potřebné síly vztahem:

$$\gamma_s = \frac{F_d}{F_c} \cdot 100 [\%] \quad (2.11)$$

Aby bylo dosaženo dobré účinnosti je zapotřebí volit pro různé materiály, použitá maziva a dílčí deformace takový úhel tažného kužele, při kterém je dosaženo nejvyšší účinnosti přetvoření.

Pro přetvoření platí:

- z hlediska přetvárné účinnosti jsou ideální úhly v rozmezí 6° až 12°,
- s velikostí dílčí deformace se hodnota úhlu snižuje a opačně,
- optimální úhel je v poměrně širokém rozsahu nezávislý na rychlosti tažení (při odpovídajícím způsobu mazání),
- optimální úhel je taktéž závislý na vlastnostech použitého maziva a na podmínkách mazání, tj. na součiniteli vnějšího tření.

Ve většině rovnic pro výpočet tažných sil není započítána síla potřebná na překonání tření ve válcové části průvlaku. Ve válcové části už nedochází k plastické deformaci, ale materiál je stále pod tlakovým napětím. S větší délkou kalibračního oka se zvětšuje i potřebná tažná síla. Podle klasických teorií tažení je tažná síla především funkcí těchto veličin: $F = f(S_1, R_m, \varepsilon, \mu, 2\alpha)$.

Tažná síla je tím větší, čím větší je průřez drátu S_1 , dílčí deformace ε , součinitel vnějšího tření μ a tím čím má materiál vyšší pevnost v tahu. Vliv úhlu tažného kužele průvlaku „ 2α “ je složitější. Z uvedených veličin se za daných technicko-výrobních podmínek tažení složitě stanovuje součinitel vnějšího tření μ . Při běžném tažení se jedná o kluzné smíšené tření mezi povrchem drátu a pracovní části průvlaku s koeficientem $\mu = 0,01$ až $0,1$.

Celková přetvárná práce je definována vztahem:

$$W_c = W_d + W_t + W_z [J \cdot 10^{-3}], \quad (2.12)$$

$$W_d = V \cdot R_{ms} \ln \frac{S_0}{S_1} [J \cdot 10^{-3}], \quad (2.13)$$

$$W_t = V \cdot R_{ms} \ln \frac{S_0 \mu}{S_1 \alpha} [J \cdot 10^{-3}], \quad (2.14)$$

$$W_z = V \cdot R_{ms} \cdot \frac{2}{3} \alpha [J \cdot 10^{-3}], \quad (2.15)$$

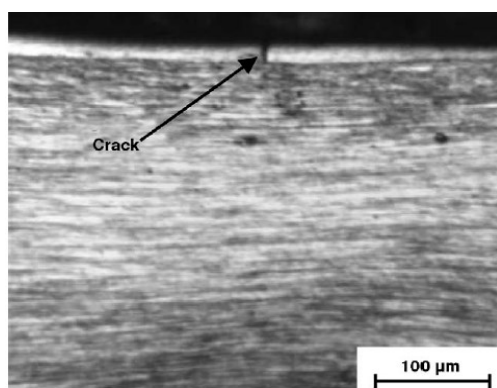
$$W_c = V \cdot R_{ms} \cdot \ln \frac{S_0}{S_1} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2\alpha}{3 \ln \frac{S_0}{S_1}} \right) [J \cdot 10^{-3}], \quad (2.16)$$

kde : V – objem drátu [mm^3],

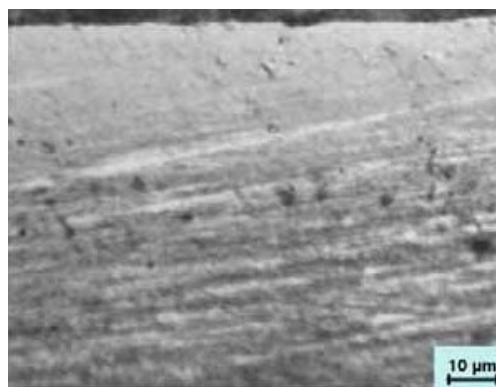
R_{ms} – střední mez pevnosti drátu v tahu [MPa].

2.4 Změna teploty drátu při tažení [6],[8],[13]

Při použití technologie tažení dochází k značnému ohřevu drátu. Teplo, které se tvoří při tažení je odpovídající práci pro překonání tření a hlavně práci nezbytné k plastické deformaci. Při tažení drátu v něm zůstane více než 90 % tepla (při narůstající tažné rychlosti narůstá i procento vneseného tepla) a jen 10 % vneseného tepla odebere nástroj. Teplo, které je vytvořeno během procesu tažení musí být odváděno. Z nástroje se nejčastěji odvádí použitím chlazení olejem nebo vodou a z drátu kontaktem drátu s chlazeným tažným bubnem. Při tažení může dojít k ohřevu drátu a následnému vzniku martenzitické struktury, jak je vidět na obr. 9. Tato struktura je při tažení drátů nežádoucí. Při zpracovávání uhlíkových ocelí s přibližně eutektoidním složením dochází k těmto vadám nejčastěji. Drát je zahřát nad teplotu 723 °C, dojde k přeměně struktury austenitu a při následujícím radikálním ochlazení povrchové vrstvy vzniknou zakalené struktury.



a) zóna zpevnění na povrchu a výskyt trhlin



b) martenzit na povrchu drátu vzniklý jako důsledek špatných parametrů tření

Obr. 9 Martenzitická struktura [8]

Množství tepla vznikajícího při tažení v důsledku deformační práce lze vyjádřit následující rovnicí:

$$q = \frac{945 \cdot 10^{-4} \cdot q \cdot R_{ms} \cdot (1 - n) \cdot d_1^2 \cdot v}{1 - q} \quad [J] \quad (2.17)$$

Množství tepla vznikajícího při tažení v důsledku vnějšího tření lze vyjádřit tímto vztahem:

$$q = \frac{1030 \cdot 10^{-4} \cdot (0,77 - \sqrt{q}) \cdot R_{ms} \cdot (1 - n) \cdot d_1^2}{1 - q} \quad [J] \quad (2.18)$$

kde: d_1 – výstupní průměr drátu [mm],
 n – parametr charakterizující podíl tepla, které přejde do průvlastu $n = 0,1$ při vyšších rychlostech $v [m \cdot min^{-1}]$ $n \rightarrow 0$,
 R_{ms} – střední mez pevnosti drátu [MPa],
 q – dílčí úběr [-].

2.5 Vliv geometrie průvlatku [2],[4],[6],[8],[13],[15]

Průvlak i drát se při procesu tažení ohřívají vlivem tření a hlavně přeměnou deformační práce v teplo. Při tažení drátu také působí na ohřev drátu pracovní podmínky. Z praxe je známo, že se čistá deformační práce transformuje asi z 90 % až 95 % v teplo a asi 10-5 % je odváděno drátem v podobě zvýšené latentní energie.

Největší účinnost přetvárné práce při tažení drátu přes průvlak se vyskytuje v relativně malém rozsahu zvoleného úhlu kužele průvlatku „ 2α “. Při malém úhlu tažného kužele narůstá práce na překonání tření mezi drátem a průvlakem, při velkém úhlu tažného kužele narůstá práce potřebná na překonání dodatečných vnitřních posunů materiálu.

Prodloužení délky kalibračního válce průvlatků zvyšuje v oblasti malých a středních úběrů do 25 % požadavek na deformační práce při tažení.

Také tažná rychlost ovlivňuje ohřev povrchových vrstev drátu, na této rychlosti závisí doba styku povrchu drátu s průvlakem, který odvádí teplo z povrchu drátu. Množství tepla, které je zachyceno drátem a množství které je zachyceno průvlakem je závislé na teplotě, ochlazování a tepelné vodivosti průvlatku. Teplo, které vzniká třením se přenáší vedením z vnějších vrstev drátu k jeho vnitřním vrstvám, do té doby, pokud se teploty nevyrovnají.

Rychlost vytvoření tepla při stávajících používaných rychlostech je v řádech milisekund, proto je nezbytné počítat s vysokými teplotami a strmými teplotními spády. Velké hodnoty teplot mají negativní dopad na mazání, také zbytková napětí, která jsou způsobena velkým rozdílem mezi povrchem a jádrem jsou nežádoucí pro další zpracování drátů.

Podmínky deformace kovů se mění v závislosti na rychlosti tažení. Při růstu tažných rychlostí se zvyšuje také deformační rychlost a obecně se zvyšuje deformační odpor materiálu. S nárůstem tažné rychlosti se začíná značně projevovat tepelný efekt jako důsledek transformace mechanické energie tažení na tepelnou. Tento jev způsobuje, že v pásmu deformace dochází k růstu teploty a ke zmenšení deformačního odporu taženého drátu. Společně s tím se mění i součinitel vnitřního tření.

Působením těchto základních vlivů se mění tažná síla v závislosti na rychlosti tažení. Tepelný efekt nemá při nízkých rychlostech výraznější vliv na deformační odpor. Výrazné snížení deformačního odporu a součinitele tření je způsobeno tepelným efektem při vysoké tažné rychlosti, což má za následek snížení tažné síly.

Bylo vyzkoumáno, že je potřeba pro zvýšení tažné rychlosti zmenšit úhel tažného kužele průvlatku a zmenšit délku kalibračního oka průvlatku.

2.6 Tažná rychlost [4],[8],[13]

Velikost vzniklého tepla v procesu tažení závisí společně s kvalitou povrchu drátu na tažné rychlosti. V tabulce 2. je uvedena doporučená rychlost pro tažení jednotlivých materiálů. Z této rychlosti lze dopočítat rychlost jakou materiál vstupuje do průvlatku. Protože v něm nedochází ke změně objemu, ale pouze ke změně průřezu, je možné velikost rychlosti určit pomocí zákona o zachování objemu. V průvlaků dochází k přetvoření průřezu taženého drátu z většího průměru na menší, proto je rychlost na vstupu menší než na výstupu a proto platí:

$$v_i \cdot d_i^2 = v_f \cdot d_f^2, \quad (2.19)$$

kde: v_i – vstupní rychlost [$m \cdot s^{-1}$],

d_i – vstupní průměr [mm],

v_f – výstupní rychlost [$m \cdot s^{-1}$],

d_f – výstupní průměr [mm].

Tab. 2 Doporučená rychlost závislosti na mezi pevnosti v tahu [4].

Materiál	Vstupní mez pevnosti v tahu [MPa]	Doporučená rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
Ocel	400	20
	800	15
	1300	10
Med'	250	20
Mosaz, bronz	400	20
Hliník a slitiny hliníku	80-100	25

2.7 Tření a maziva [11],[17]

V technologických tvářecích procesech má vnější tření dvě úlohy:

- úlohu pasivního činitele, který brání v rozvoji deformace, zvyšuje spotřebu energie nutné k deformačnímu procesu a jeho následkem je opotřebení nástrojů,
- úlohu aktivního činitele, jelikož bez existence vnějšího tření by nemohly proběhnout tvářecí procesy jako je válcování, kde je nezbytné vnější tření pro záběr materiálu na tvářecím válci.

Vnější tření působí na technologické tvářecí procesy takto:

- působí na rozložení a velikost deformačního odporu, a tím i na výsledný silový účinek na nástroji,
- má vliv na stav napjatosti a deformace v tvářeném objemu a rovněž na stupeň deformace,
- má vliv na spotřebu energie k vykonání tvářecího pochodu,
- má přímý vliv na opotřebení, a tím i na životnost nástrojů,
- působí na stav, průběh a rovnoměrnost deformace, a tím i na mechanické vlastnosti tvářeného kovu,
- má vliv na celý průběh tvářecího pochodu.

Z těchto skutečností je zřejmé, že znalost zákonitostí, kterými se řídí vnější tření při tvářecích procesech, má velký význam jak pro technologickou, tak pro ekonomickou stránku tvářecích procesů.

Při technologických tvářecích pochodech jsou známy tři základní druhy tření, které se odlišují svou fyzikální podstatou:

- suché tření, v jehož průběhu dochází k přímému styku nástroje a materiálu bez mezivrstvy jiné látky, jde o tření při přímém dotyku nástroje s tvářeným materiálem,
- tření s uplatněním viskózně plastického účinku maziva, které tvoří souvislý povlak na stykových plochách nástrojů,
- tření s uplatněním hydrodynamického účinku maziva, které je v podstatě třením kapalným.

Použití maziva má mít za následek snížení odporu tření a tím umožnit větší stupeň deformace, snížení spotřeby energie na překonání pasivních odporů a zvýšení deformační účinnosti, zmenšení otěrů nástrojů, zabránění jejich zadírání a prodloužení jejich životnosti. Navíc je dosaženo hladšího povrchu tvářeného materiálu. Maziva jsou používána především při tváření za studena, ale v některých případech je třeba použití maziv i při tváření za tepla.

Během tažení drátu je kovový materiál protahován za studena průvlakem s průměrem totožným s výsledným průměrem výrobku. Při tzv. mokřém tažení, u něhož vychází z tvářecího procesu hotový výrobek s požadovaným tvarem a s kvalitním povrchem je nutné věnovat výběru maziva, které má zajistit menší tření a dostatečné chlazení velkou pozornost.

Za sucha jsou taženy dráty při lehkých operacích (malých redukcích průřezu, malé pevnosti materiálu) bez větších nároků na kvalitu povrchu materiálu. K mazání jsou nejčastěji používána prášková mýdla, případně s grafitem nebo i jiná tuhá maziva.

Druh a parametry maziva se řídí tvářecím procesem a druhem tvářeného materiálu a jeho předběžnou úpravou.

Materiál je předběžně fosfátován, louhován vápnem, mořen boraxem, pokrýván oxaláty (nerez), silikáty (ocel), a jiné, aby bylo dosaženo optimálního povrchu, který podporuje zachycení maziva na drátě. Při menších rychlostech a velkých zatíženích je důležitější mazivost, naopak při velkých rychlostech je to viskozita maziva. Čím se mazivo pevněji váže na kov, tím obtížněji se odstraňuje.

Proces tažení je obtížný v případě pevných kovů a jejich slitin (niklových a chromových ocelí) např. při tažení velmi jemných žárovkových drátů se udává jako jediné vhodné mazivo vodní emulze s grafitem a 10 % kyseliny sírové pro diamantové průvlakky.

Volba maziva pro tažení tyčí je snadnější: předem upravený tyčový materiál (mořením, louhováním, tryskáním) je při tažení průvlakem zaplavován kapalným mazivem, nejčastěji maštěným ropným olejem s viskozitou $60 - 150 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ při 50°C podle podmínek tažení. Při tažení ocelových tyčí jsou používány i emulze nebo prášková mýdla.

Při mokřém tažení drátů jsou používána převážně koncentrované metastabilní emulze s dobrou mazací schopností. Ta může být zvýrazněna použitím aktivovaných emulzí obsahujících olej. Někdy jsou používána i kombinovaná maziva, a to kapalná (ropné oleje) v oběhové soustavě a plastická v mazacím zařízení zařazeném před nástrojem.

2.8 Způsoby tažení drátu [4],[6],[8],[15]

Proces tažení drátu přes jeden průvlak se nazývá jednorůchodové tažení. Při použití více průvlaků na jeden tah se proces nazývá víceprůchodové tažení neboli tandemové tažení. Proces tažení drátu je také nazýván podle průměru taženého drátu na velmi jemné (průměr drátu menší než 0,7 mm), jemné tažení (průměr drátu 0,7 – 1,6 mm), střední tažení (průměr drátu 1,6 – 4,2 mm) a na hrubé tažení (průměr drátu 4,2 – 16 mm).

Jednorůchodové tažení, taktéž popisováno jako jednoduché, je používáno především při malé změně redukce průřezu drátu. Stroje pro jednoduché tažení jsou používány na dokončovací operace (střední až velmi jemné tažení). Tento způsob spočívá v tažení drátu na jeden tah přes jeden průvlak, při potřebě větší redukce se musí již jednou protažený drát táhnout znovu dalším průvlakem.

Víceprůchodové tažení, taktéž nazývané tandemové tažení, je způsob, který je používán ve velkosériových výrobcích, kde jsou zapotřebí velké úběry. Jsou zde zároveň kladeny vysoké požadavky na jakost povrchu drátu. Pro tento způsob tažení jsou používány dva typy tažných stolic. Buď s vertikálním nebo horizontálním postavením tažných bubnů. Tento způsob tažení je vhodný pro všechny materiály i druhy tažení. Největší výhodou tohoto způsobu tažení je velký úběr na jeden tah.

2.9 Odokujování ocelového drátu [8]

Okuje se nachází na povrchu ocelového drátu. Jejich vlastnostmi jsou tvrdost, křehkost, obtížná tváritelnost, způsobují velké tření, což jsou negativní vlastnosti, které je nutné eliminovat před tažením. Z toho důvodu se odstraňují, a to postupy chemickými, mechanickými, elektrochemickými a speciálními.

- Chemické odokujování (moření) spočívá v chemické reakci oxidů, které se nachází na povrchu kovu a tvoří vrstvu okují, ale také reakcí s ocelí. K moření se používají kyseliny, při reakci vznikají soli kovů a voda. Vrstva okují je typicky tvořena více vrstvami různých oxidů, které ovšem nejsou zřetelně odděleny. Jednotlivé vrstvy nejsou chemicky ani mechanicky stejnorodé, stejně tak jako je nepravidelná jejich krystalová mřížka, obsahují trhliny, póry, bubliny atd. Protože se liší podmínky vzniku okují, je zřejmé, že ani jejich chemické složení, síla vrstvy, soudržnost či pórovitost není stejná. Proto i doba moření se bude v závislosti na těchto parametrech lišit.
- Mechanické odokujování - ve strojírenství se nejvíce využívá dvou způsobů mechanického odokujování:
 - ohýbání drátu v žilách s následným mechanickým čištěním povrchu,
 - tryskání drátu v žilách, svitcích, nebo ve šroubovici.

Při odstraňování okují se využívá vlastnosti lámání a následnému odpadávání okují, ke kterému dochází při překročení hranice 12-ti procentní deformace, protože okuje jsou křehké a málo tažné. Při tomto postupu se využívá systému dvou a více kladek, a to v jedné nebo dvou rovinách.

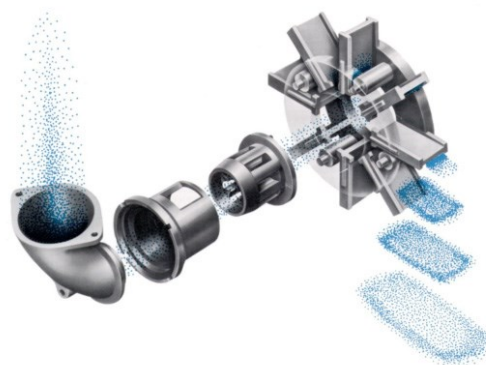
Odokujování ohýbáním, při tomto postupu odstraňování okují se využívá systému kladek, což je jednoduché a nenáročné a neklade vysoké nároky na obsluhu ani údržbu. Drát, který zbavujeme okují a který prochází zařízením, musí být suchý. To lze považovat za nevýhodu. Tato metoda nachází využití u drátů z nízkouhlíkových ocelí do průměru přibližně 10 mm. Na obr. 10 je vidět část stroje, který slouží k mechanickému odstraňování okují. Využívá lamače okují a rotačních kartáčů, které čistí povrch procházejícího drátu. Tyto lamače, kartáče a vlastní drát se nachází ve vzájemně různých polohách, což je pro tyto stroje běžné. Nevýhodou může být i nedokonalé odstranění okují, které je závislé na chemickém složení oceli, na rozmístění a počtu kladek a kartáčů, či počtu ohybů drátu.



Obr. 10 Odokujování kartáčováním [32]

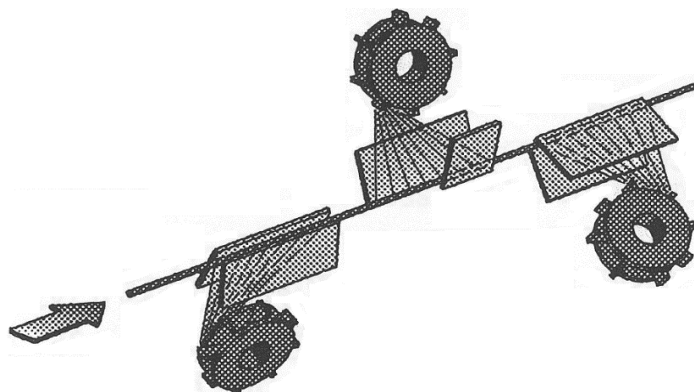
Odokujování tryskáním- tato metoda využívá abrazivních vlastností materiálů pohybujících se vysokou rychlostí a dopadajících na opracováváný povrch. Jako abraziva se využívá např. ocelová či litinová drť, granulát, ocelové broky, sekaný drát aj. Tuto metodu lze použít i k odstranění barvy či sazí, které vznikají ze zbytků maziv při žíhání drátu. Využívají se tři základní způsoby, jak částicím dodat velkou rychlost:

- tlakové trysky,
- sací trysky,
- metací kola.



Obr. 11 Odokujování tryskáním [33]

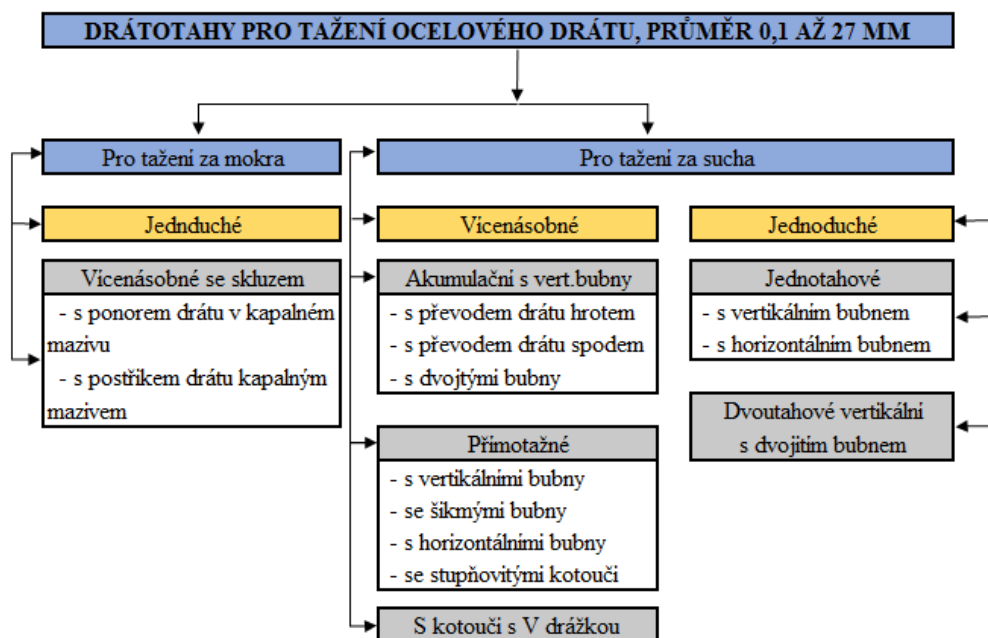
Tlakové a sací trysky se používají pro lehčí abraziva např. plastových kuliček, což je ovšem k účinkům nevhodné pro použití na tvrdé okuje. Zde nachází uplatnění metací kola viz obr. 11, která dokáží využívat těžkých abraziv. Otáčí se s rychlostí $500-4000 \text{ ot.min}^{-1}$, přičemž rychlost dopadu je v rozpětí $15-120 \text{ m.s}^{-1}$. Používají se také zařízení pro tryskání drátu ve svitku. Dva otáčející se svitky drátu jsou umístěny v tryskací komoře na rameni, ale i tak je zde reálná hrozba, že z některých míst nebudou okuje abrazivem odstraněny. Při tryskání drátu v žilách je nejdůležitější správné rozmístění metacích kol a jejich vzdálenost od povrchu drátu. Pokud jsou tyto podmínky splněny, je možné vyřadit proces chemického odstraňování okují a tím je možné dosáhnout nemalých úspor ve výrobě. Na obr. 12 je schematicky znázorněno otryskávání drátu v žíle.



Obr. 12 Otryskávání drátu v žíle [8]

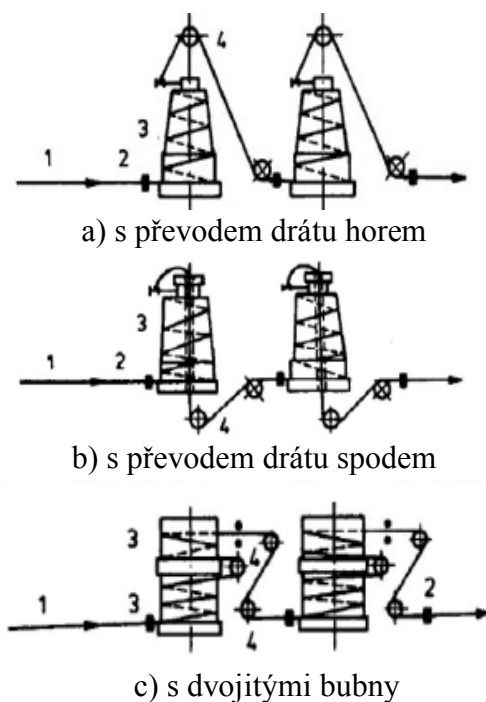
2.10 Stroje pro tažení drátů [1],[2],[8],[9]

Stroje používané pro tažení ocelového drátu tzv. drátotahy se dají rozdělit do několika skupin, kdy základní rozdělení je na tažení za mokra a za sucha. Akumulační drátotahy využívají větší zásobu drátu na bubnech, pracují za sucha a bez skluzu. Drátotahy s klínovou drážkou naopak pracují bez zásoby drátu, ale také bez skluzu. Pro tažení za mokra jsou typické drátotahy se skluzem. Další rozdělení je uvedeno schématicky na obr. 13.



Obr. 13 Schematické rozdělení drátotahů

- Akumulační drátotahy- tyto drátotahy pracující za sucha mají zásobu ocelového drátu na jednotlivých bubnech. Tyto tažné bubny jsou neměnného průměru a jejich otáčení je závislé na prodloužení drátu. Je zde přímá závislost velikosti prodloužení a rychlosti otáčení, tzn. čím je drát delší, tím se buben otáčí rychleji. Drát je směřován přes jednotlivé průvlakly z bubnu na buben za pomoci otáčejících se kladek. Zásoba drátu na jednotlivých bubnech pak zajišťuje dorovnání malých rozdílů v rychlosti. K zamezení přetržení drátu je zapotřebí, aby na následujícím tažném bubnu bylo méně drátu než na předchozím. Jednotlivé úběry drátu tak musí být větší než jednotlivé úběry zařízení a tím dochází při tažení k akumulaci drátu na jednotlivých bubnech. Z obr. 14 je patrné, že se v praxi využívá akumulacních drátotahů s převodem drátu pomocí horní kladky,



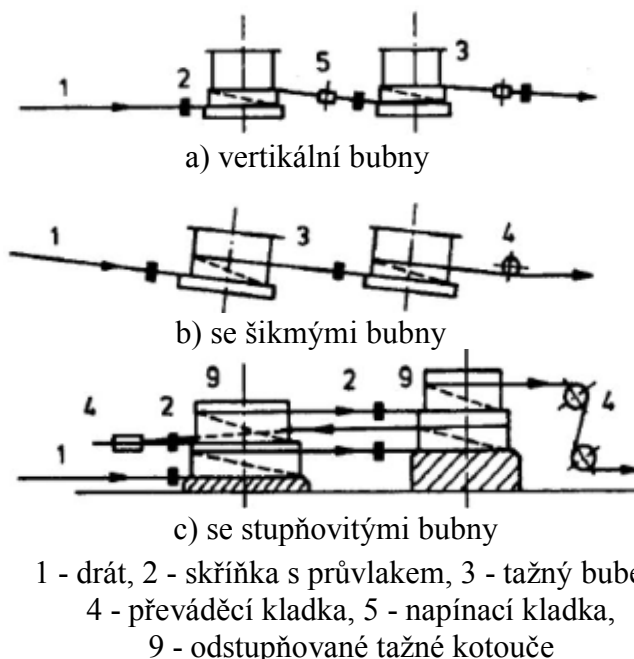
1 - drát, 2 - skříňka s průvlakem, 3 - tažný buben, 4 - převáděcí kladka.

Obr. 14 Akumulační drátotahy [8]

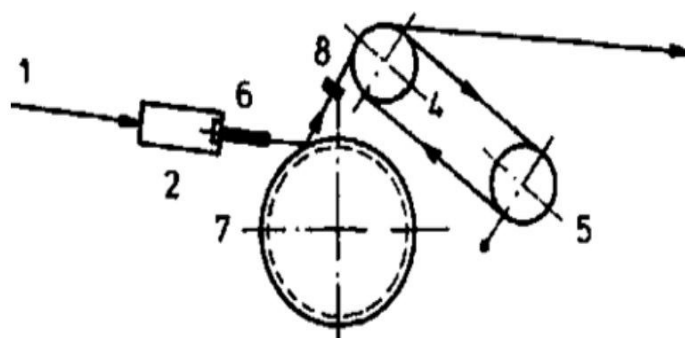
spodní kladky a s dvojitými bubny. Nejběžněji dostupnými stroji pro akumulční tažení drátu jsou drátotahy s dvojitými bubny pro ocelový drát v průměru cca 0,3-3,5 mm.

- Přímotažné drátotahy pracující za sucha - u přímotažných drátotahů je stejná průtažná rychlost drátu a obvodová rychlost tažného bubnu, viz obr. 15. Toho faktu je docíleno automatickou regulací u tažného bubnu. U tažných bubnů musí být zajištěno dostatečné tření, aby byla vyvinuta dostatečná síla k tažení drátu. To je zajištěno využitím více závitů drátu na jednom bubnu. V současnosti jsou tažné bubny konstruovány pro více závitů i z důvodu zlepšení chlazení. U moderních přímotažných drátotahů se využívá stupňovitých bubnů či tabulového uspořádání tažných bubnů. Jsou schopny táhnout ocelový drát v průměru cca. 0,2 – 8 mm, u ocelových nepatentovaných drátů a předtahových ocelových drátů se průměr pohybuje v rozmezí 3-4 mm. Dále je možné využít s úspěchem vícenásobných akumulčních drátotahů s horní předávací kladkou. V současnosti se ověřuje využití přímotažů se stupňovitými bubny, které splňují požadavky na minimální

rozměry. Mezi přímotažné drátotahy za sucha patří také drátotahy s V drážkou obr. 16. Tento typ strojů patří k moderním vícenásobným drátotahům pracujícím za sucha a bez skluzu. Tažná kladka tohoto zařízení je opatřena klínovou V-drážkou a není zapotřebí zásoby ocelového drátu na cívce. Tento způsob tažení umožňuje rychlejší a snadnější zatahování drátu, snadnější vedení drátu zařízením, je možné táhnout dráty o velké rozmanitosti průměrů, nižší hlučnost, jednodušší obsluhu, použití přímého vodního chlazení spolu se zamezením vzdušného chlazení a ohýbání taženého drátu jedním směrem.

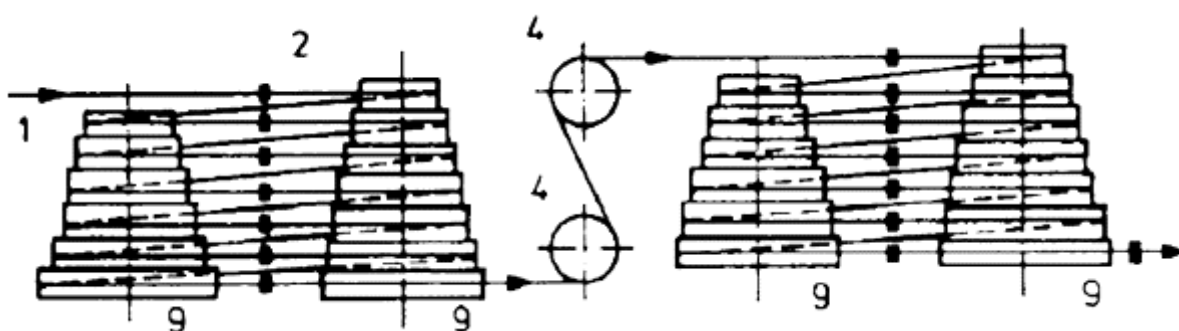


Obr. 15 Princip vedení drátu na přímotažném drátotahu [8]



Obr. 16 Princip vedení drátu-drátotahu s V drážkou [8]

- Drátotahy pracující za mokra se skluzem a ponorem drátu v mazivu. Vícenásobné drátotahy pracující za mokra se skluzem viz obr. 17 využívají vedení drátu mezi dvěma průvlakem pomocí tažných kol. Na každém kole je drát navinut 1- 3krát. Dostatečné tření na jednotlivých kolech zajišťuje vznik tažné síly pro vlastní tažení drátu. Rychlost protahování se postupně zvyšuje, čehož se dosáhne postupným zvětšením průměru tažných kol.



1 - drát, 2 - skříňka s průvlakem, 4 - převáděcí kladka, 9 - odstupňované tažné kotouče

Obr. 17 Princip vedení drátu na drátotahu pracujícím se skluzem [8]

Obvodová rychlost jednotlivých po sobě jdoucích kol je navržena tak, aby každé tažné kolo mohlo odvést více drátu, než je schopné projít následujícím průvlakem. Obvodová rychlost tažného kola mezi po sobě následujícími průvlakem je vyšší o 3 – 5 % než je rychlost protahovaného drátu mezi danými průvlakem. Koeficientem skluzu označujeme podíl rychlosti drátu a obvodové rychlosti kola, může být menší než 1, maximálně roven 1. Po převedení tohoto koeficientu na procenta získáme velikost skluzu. V praxi se tento typ drátotahu používá k tažení ocelového drátu o průměru cca 0,1 – 0,9 mm. Současné skluzové drátotahy využívají klasických stupňovitých kotoučů uložených na sklopných hřídelích viz obr. 18 nebo stupňovitých kol na hřídelích ve vaně s mazací emulzí, kde jsou pevně zabudovány. Vícenásobné drátotahy se stejným průměrem tažných kol a mazáním drátu ostřikem nachází uplatnění u tažení drátů s průměrem pod 0,2 mm.



Obr. 18 Stupňovitý drátotah [34]

2.11 Pomocné vybavení [8], [9]

Nezbytnou součástí tažné linky je pomocné zařízení. Toto vybavení se liší dle typu a velikosti linky. Mezi pomocné stroje a zařízení k drátotažným linkám patří:

- Průvlakové skříňky viz obr. 19 – hlavní funkcí průvlakových skříněk je znemožnit pohyb průvlatku ve směru tažení. Dále se uplatňují jako zásobník pro mazivo a zprostředkovávají chlazení průvlatku vodou. Součástí dodávky tažného zařízení drátu jsou rozmanité typy průvlakových skříněk. Na obr. 20 je rotační vodou chlazená průvlaková skříňka se zásobníkem maziva.

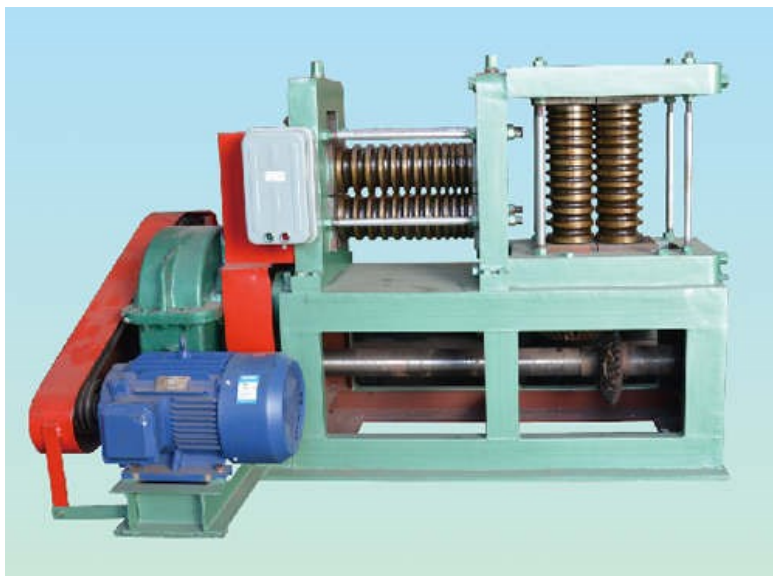


Obr. 19 Průvlaková skříňka se zásobníkem práškového maziva



Obr. 20 Průvlaková skříňka se zásobníkem maziva [35]

- Aplikátory maziva – patří mezi pomocné zařízení, které zajišťuje lepší vedení drátu přes zásobník maziva.
- Hrotovačky – zajišťují, aby protahovaný drát prošel bez obtíží a dostatečné délce průvlatkem, tím že hrotuje konce drátů. A následně ho mohly uchopit zatahovací kleště. Dráty větších rozměrů se hrotují v hrotovačkách, naopak hrotování tenkých drátů probíhá ručně pomocí pilníků ve zvláštním zařízení, které mívá obsluha stroje po ruce. Mezi běžně používané

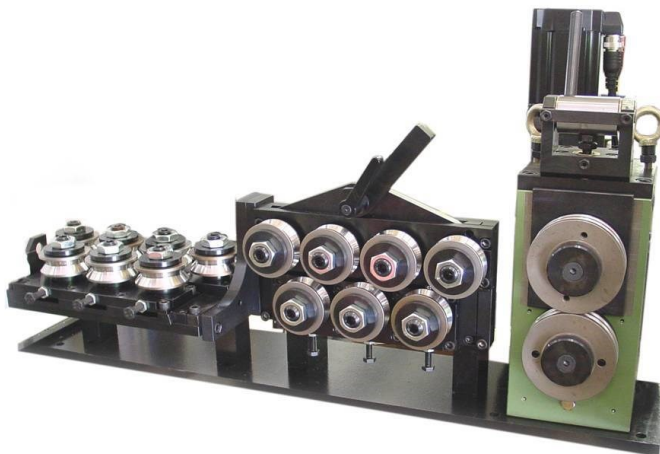


Obr. 21 Hrotovací zařízení [36]

hrotovačky patří válcové hrotovačky. Jedná se o dva válce z kalené oceli, které jsou opatřeny drážkami odlišných průměrů postavené tak, aby stejné poloměry stály proti sobě. Strojní hrotovačky pohání elektromotor, jelikož je jejich pohyb nepřetržitý, drážky se ve válci rozšiřují a zužují tak, aby se drát lehce do válce vtáhl a aby byla redukce postupná. Zařízení k hrotování drátu je uvedené na obr. 21. U ručních hrotovaček dochází k pohybu válců proti

sobě a pracovník tvoří hrot tím, že v drážce daného rozměru protáčí konec drátu a současně pákou otáčí válci. Přecházením z větší drážky do menší drát ztenčuje.

- Rovnačky viz obr. 22 – jejich úlohou je přichystat z kruhového drátu drát vyrovnaný a nastříhaný na dané rozměry nebo jej znovu převinout do kruhu, aby se odvínoval mrtvě (tzv. drezovaný drát). Drezury neboli rovnačky na drátotazích jsou tvořeny sestavou nastavitelných kladek. Jejich uspořádání v jedné nebo více rovinách zajišťuje umrtvování drátu před navíjením na poslední snímací buben drátotahů.



Obr. 22 Rovnačka drátu [38]

- Odvíjecí a navíjecí zařízení – využití drátotahů a související produktivitu práce při tažení drátu zásadně ovlivňuje odvíjecí a navíjecí zařízení. Téměř kontinuální chod drátotahů je možný zajistit za podmínky aplikace vysokých hmotností drátu na odvíjedlech a navíjedlech. Pro specifické podmínky je nutné individuálně přizpůsobit tato zařízení.

Práci při obsluze drátotahů lze rozdělit na tři části, a to na: práci s drátem na odvíjedle viz obr. 23, práci s drátem na navíjedle, práci v oblasti vlastní drátotahu.



Obr. 23 Horizontální odvíjedlo [35]

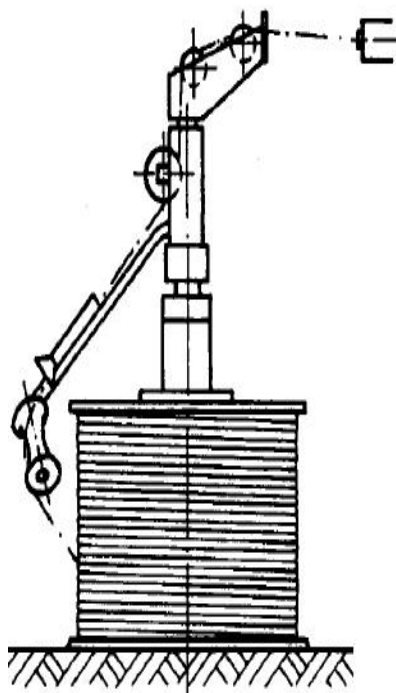
Hmotnost drátu na odvíjedle, plynulost odvíjení drátu, počet potřebných svárů ke spojení konců a dopravní podmínky jsou významně ovlivněny časem, který je zapotřebí k obsluze.

Čas nutný k obsluze navíjedla dále závisí na užitém typu drátotahu a navíjedla, na dopravní kapacitě, na hmotnosti a systému uložení drátu pro další zpracování v podniku, na nárocích odběratelů z hlediska hmotnosti a uložení drátu do svitku nebo zásobníku.

Jen v podnicích, kde se hojně využívají drátotahy je vhodné, vzhledem k hospodárnosti, použití velkých hmotností drátu na odvíjedlech nebo navíjedlech, které vyžadují speciální investiční zařízení.

Odvíjedla je nutné přizpůsobit určitým podmínkám jako jsou výchozí průměr drátu, rozsah odvíjecí rychlosti, jakosti zpracovávaného materiálu, rozměrům svitku nebo cívky a pokud dojde k přetržení drátu tak k vypnutí stroje a rychlému účinnému brždění.

Dále můžeme odvíjedla dělit podle použitého materiálu na: odvíjedla pro válcovaný drát nebo pro přetahovaný drát. Z hlediska principu odvíjení drátu na rotační (radiální) viz obr. 24, stacionární s axiálním odvíjením drátu přes hlavu, viz obr. 25. Z pohledu os na vodorovná nebo svislá a z hlediska způsobu odvíjení na zařízení na svitky drátu nebo na cívky s drátem.



Obr. 24 Rotační odvíjedlo [8]



Obr. 25 Stacionární odvíjedlo s axiálním odvíjením drátu přes hlavu [8]

Navíjedla je potřebné přizpůsobit především těmto podmínkám (maximální rychlosti tažení, jakosti taženého drátu, rozměrům taženého drátu, požadavkům na minimalizaci počtu pracovních operací), požadavkům na další použití drátu (pro účely expedice podle přání zákazníka, pro účely dalšího zpracování v rámci závodu).

Navíjedla lze rozdělit podle různých hledisek:

- Z hlediska způsobu navíjení drátu na: navíjení drátu na cívku. obr. 26, navíjení drátu do svitku, viz obr. 27.



Obr. 26 Navíjení na cívku



Obr. 27 Navíjení do svitku [39]

- Z hlediska principu navíjení drátu na svitky rozdělujeme navíjedla na:
 - a) zařízení se zkrutem po jeho délce (bez prův laku nebo s prův lakem), s horizontální viz obr. 28 nebo vertikální viz obr. 29 osou navíjení drátu ukládaného navíjecím ramenem na stacionární buben a s ukládáním drátu do různých zásobníků,
 - b) zařízení bez zkrutu drátu po jeho délce (bez prův laku nebo s prův lakem) s komínovým rozetovým nebo spirálním ukládáním drátu do otáčejících se zásobníků různé konstrukce.



Obr. 28 Horizontální navíjecí zařízení [39]



Obr. 29 Vertikální navíjecí zařízení [39]

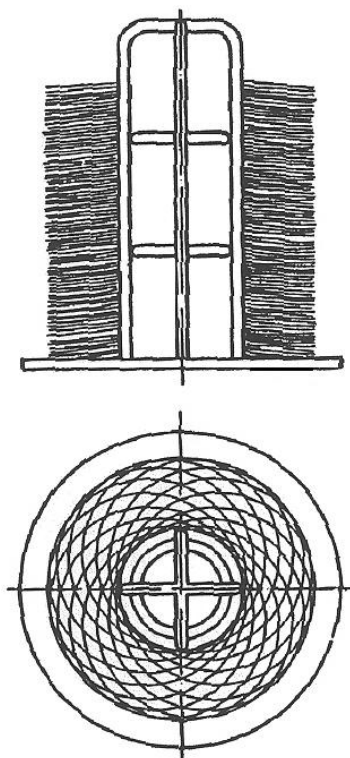
Poslední tažný buben drátotahu se závěsem pro snímání, je základním typem zařízení pro ukládání drátu do svitku. Vytlačování jednotlivých závitů taženého drátu po bubnu nahoru zajišťuje vhodný rádius u kořene bubnu (2,5 až 3 násobek průměru drátu) a konicita bubnu, která je v závislosti na pevnosti drátu 1° až $2,5^\circ$.

Zařízení složené z vlastního navíjecího zařízení, navíjecího kotouče a zásobníku slouží k navíjení drátu do svitků se skrutem drátu po jeho délce.

Za pomoci vodících kladek je drát veden dutou hřídelí k vlastnímu navíjecímu zařízení, ramenu, které ukládá drát závit po závitě na stacionární navíjecí kotouč, pomocí převáděcí kladky. Z kotouče padají jednotlivé závity drátu do zásobníku viz obr. 26. U drátů citlivých na zkrut jsou používány tzv. „tahové Vicklery“. Tato navíjedla také pracují se stacionárním navíjecím kotoučem, ale převáděcí navíjecí kladka je nahrazena prův lakem s úběrem asi 10 %. Vliv zkrutového napětí je touto deformací drátu eliminován.

Kombinace navíječe drátu do svitku s drátotahem je užívána u širokých drátů. Tyto navíječe jsou opatřeny otáčejícím se navíjecím kotoučem, ze kterého padají jednotlivé závity drátu do zásobníku.

Zařízení k navíjení drátu na cívku obr. 30 se užívají v podnicích na výrobu ocelového drátu. Snadný způsob



Obr. 30 Navíjecí kotouč [8]

odvíjení navinutého drátu na cívku je využívá při další manipulaci s drátem v rámci jednoho provozu například když po procesu tažení následuje tepelné zpracování. Drát na cívce také vytváří podmínky pro lepší manipulaci a dopravu drátu. Nevýhodou je nutnost vracet prázdné cívky do tažírny.

- Zatahovací kleště slouží k zachycení a zatažení zesláblého konce drátu na tažný buben. Zeslabený konec drátu se po procesu hrotování zachytí kleštěmi různého tvaru a konstrukce viz obr. 31 a 32 připojeným řetězem nebo lanem na buben a pomalým otáčením bubnu (zatahovací rychlostí) se drát protahuje průvlakem a navíjí na buben.



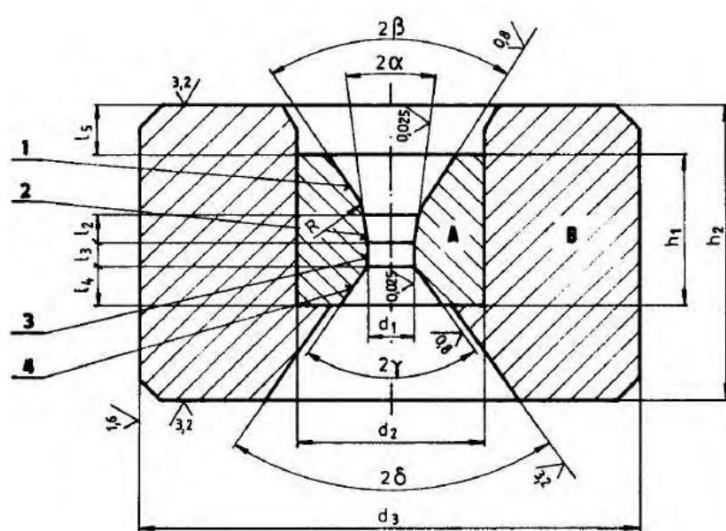
Obr. 31 Zatahovací kleště
[35]



Obr. 32 Zatahovací přípravek pro velké průměry drátů

3 PRŮVLAKY [1],[2],[4],[6],[8],[9]

Při procesu tažení ocelového drátu je hlavním používaným nástrojem průvlak viz obr. 33. Proces plastické deformace, který probíhá v průvlaku je způsoben působením tlaku a zároveň působením tažné síly na drát, která je generována tažným zařízením. Docílení přesnosti taženého rozměru, mikrostruktury, potřebné mechanické vlastnosti a jakosti povrchu je dosaženo konstrukcí průvlaku. Opatření průvlaku, efektivnost tažení a tím i ekonomika výroby taženého drátu je také ovlivňována konstrukcí průvlaku. Zvolení nevhodného průvlaku nebo špatné jakosti mohou mít za následek ztrátu více financí, než jsou ceny průvlaků, protože může dojít k přerušení výroby zapříčiněné nekvalitní výrobou drátu nebo prostoje tažných zařízení. Průvlak tvoří 2 části-jádro a objímka.



- A - jádro průvlaku
- B - objímka průvlaku
- 1 - vstupní, mazací kužel
- 2 - tažný, pracovní kužel
- 3 - kalibrační válec
- 4 - výstupní kužel
- d_1 - kalibrační průměr
- d_2 - průměr jádra
- d_3 - průměr objímky
- h_1 - výška jádra
- h_2 - výška objímky
- l_2 - délka tažné části
- l_3 - délka kalibrační části
- l_4 - délka výstupní části jádra
- 2α - úhel tažné části
- 2β - úhel vstupní části jádra
- 2γ - úhel výstupní části jádra
- 2δ - úhel výstupní části objímky

Obr. 33 Schéma průvlaku [8]

Specifikace průvlaků se provádí podle materiálu jádra.

Základní rozdělení průvlaků lze provést podle materiálu jádra na:

- Diamantové průvlaky:
 - Průvlaky ze syntetických, polykrystalických diamantů – PKD (obr. 34),
 - Průvlaky z přírodních, monokrystalických diamantů – MKD (obr. 35).
- Průvlaky ze slinutých karbidů – tvrdokovové průvlaky – TKP (obr. 36),
- Průvlaky z jiných materiálů (původním materiálem pro výrobu průvlaků byl kámen).

Průvlak PKD je vyrobený slinutím diamantových prášků s přísadkou na bázi katalyzátorových kovů při teplotách nad 1 500 °C a tlacích okolo 6 000 MPa. Extrémně vysoké tlaky potřebují zvládnutí určité technologické oblasti (vysokotlaké nástroje, měřicí a regulační technika, způsob ohřevu apod.) zajišťující, že vlastní pochod slinování diamantů probíhá v podmínkách termodynamické stability a nedojde ke zpětné přeměně diamantu na grafit. Výsledkem slinování je produkt s náhodně orientovanými zrny pevně vzájemně svázanými mezi sebou pojící fázi.



Obr. 34 PKD průvlaky [40]

Následkem nepravidelné orientace krystalů má diamantové jádro stejnoměrně vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Oproti monokrystalickému diamantu nevykazuje vhodné či nevhodné směry nebo roviny štěpení, a tak směr tažného otvoru nemusí být souosý s krystalickou strukturou. Proto se syntetický diamant opotřebuje stejnoměrněji a pomaleji než přírodní diamant.

Průvlaky MKD jsou vyráběny z přírodních monokrystalických diamantů. Diamant můžeme v přírodě nalézt ve třech formách nazývaných Ballas, Bort, a Carbon. Diamanty Bort se pro výrobu průvlaků používají nejčastěji, protože jsou charakteristické kruhovým tvarem a velkou jakostí. Průměr taženého drátu a zpracováváný materiál určuje velikost krystalu. Z hlediska hospodárnosti je doporučováno používat krystaly, které jsou jen o něco málo větší než zpracováváný průměr drátu tak, aby šlo průvlak přeleštit. K výrobě průvlaků jsou aplikovány diamanty o hmotnosti 0,1 až 3,5 karátů. Krystaly jsou charakterizovány anizotropií, která hraje roli při výběru průvlaků. Směr otvoru průvlaků musí být v jistém vztahu k orientaci krystalové mřížky (odolnost proti opotřebení je v různých směrech různá).



Obr. 35 MKD průvlaky [40]

3.1 Průvlaky TKP [1],[2],[4],[6],[8],[9]

Jeden z nejpoužívanějších typů průvlaků je typ TKP, tj. průvlaky vyrobené ze slinutých karbidů. Jedná se o směsi, tvořené převážně jemnými zrnky karbidů kovů vysokou teplotou tání, která jsou navzájem spojená slinováním (kovem skupiny železa).

Základní složky jsou karbidy titanu TiC a karbidy wolframu WC. Jako pojivo je používán kobalt viz tabulka 3. Pro výrobu objímek je používána uhlíková ocel o pevnosti v tahu v rozsahu 500 – 700 MPa. Při tažení za mokra jsou používány průvlaky jak s ocelovými objímkami, tak i s objímkami z hliníku a mosazi, protože mají lepší odvod tepla než objímky ocelové.



Obr. 36 TKP průvlaky [40]

Tab. 3 Chemické složení a vlastnosti jádra průvlaků [8]

Kód podle ISO	Chemické složení jádra				Hustota	Tvrdost podle Vickerse	Tvrdost podle Rockwella	Zatížení vedoucí k příčnému lomu	Odolnost vůči tlaku	Youngův modul	Koerzivní síla
	WC	TiC	Ta (Nb) C	Co							
	[%]										
K01	96	0,7	0,3	3	15,4	1950	92,5	1500	6,1	640	300
K05	94	0,5	1	4,5	15,0	1800	93,0	1600	6,0	650	250
K10	93	1	0,5	5,5	14,9	1730	92,0	1700	6,0	630	225
K20	93	0,5	0,5	6	14,7	1630	91,6	1800	5,7	620	195
K30	90,5	-	0,5	9	14,6	1420	90,6	2000	5,4	500	150
K40	89	-	-	11	14,3	1350	89,5	2300	5,0	560	130
K50	85	-	-	15	14,0	1250	87,5	2950	4,5	530	95

Karbidy kovů WC a TiC dodávají slinutým karbidům tvrdost a otěruvzdornost, kobalt způsobuje jejich tvrdost a houževnatost. K tažení ocelového drátu jsou aplikovány slinuté karbidy skupiny WC-Co.

Postup výroby tvrdokových průvlatů lze shrnout takto:

1. výroba jádra,
2. zhotovení objímky,
3. vložení jádra do objímky,
4. zhotovení a opracování otvoru průvlatu.

Výroba jádra zde uvedená ve výčtu jakožto první krok výroby tvrdokových průvlatů lze rozdělit na 4 oblasti.

1. Výběr a příprava homogenní směsi z karbidu wolframu o zrnitosti 0,8 - 6,0 μm , kovového kobaltu o zrnitosti 1 až 1,5 μm , plastifikátoru (parafin, polyetylenglycol) a sazí, mletí surovin za mokra (přidává se aceton) v mlecích stolicích pomocí tvrdokových mlecích tělísek, zahřívání a sušení směsi, oddělení mlecích tělísek, granulace a testování směsi.
2. Výrobu jádra přímým lisováním směsi ve formě pod tlakem 80 až 200 MPa. Tlak se mění v závislosti na objemu a hustotě prášku. Pro stanovení přídavku na smrštění směsi při spékání se provádí laboratorní testy, (smrštění asi 16 až 20 %).
3. Slinování, které probíhá ve vakuové peci řízené elektricky podle předem zadaného programu. Materiál se umísťuje na grafitové kotouče. Úplný cyklus trvá 8 až 12 hodin, přičemž se teplota mění od 20 °C do teploty slinutí 1 300 až 1 500 °C. Nejmodernější slinovací zařízení provádí v jednom cyklu odplastifinování, předslinování a slinování; vše je řízeno mikroprocesorem s uplatněním naprogramovaných technologických postupů včetně možnosti uplatnění izostatického dohutňování, které odstraňuje poréznost slinutých karbidů při aplikaci velice jemnozrnných slinutých karbidů.
4. Testování jakosti povrchu, pórovitosti, mikrostruktury pod mikroskopem při zvětšení 20/200/1500 popř. metalograficky. Naměřené hodnoty musí odpovídat příslušným předpisům.

Jádro se vkládá do objímky a zajišťuje mechanickým spojením. Objímka zachycuje radiální síly vznikající při průchodu drátu průvlatem. Materiál má mít předepsanou pevnost a dobrou tepelnou vodivost. Základní podmínkou je zajištění adheze mezi povrchem jádra a vnitřku objímky.

Používají se následující postupy:

- zapouzdření za tepla,
- zapouzdření za studena lisováním.

Výroba a opracování otvoru průvlatu je prováděno v závislosti na provedení surového jádra. Většinou je v současnosti surové jádro vyráběno s předpřipraveným otvorem, který zmenšuje čas potřebný pro dokončení výroby tvrdokového průvlatu.

Pracovní postup je rozdělen do dvou fází:

- broušení dílčích částí pracovního otvoru průvlatu (tažný kužel a kalibrační válec),
- leštění jednotlivých částí otvoru průvlatu.

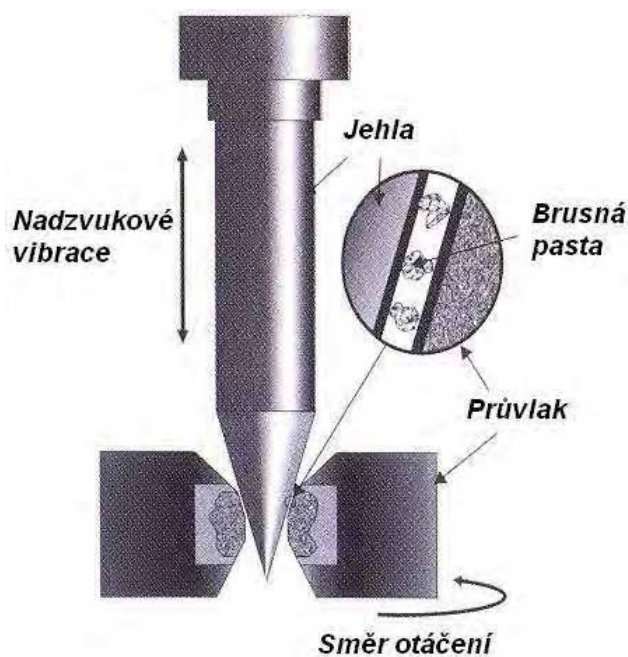
Pro hrubé zhotovení pracovní části průvlatu jsou aplikovány tyto postupy:

- velmi rychlé a produktivní vrtání otvoru laserem s horší jakostí povrchu,
- pomalejší a méně produktivní elektrojiskrové vrtání, které zabezpečuje velice jemný povrch otvoru průvlatu po opracování a může být aplikováno jako následná operace po vyvrtání otvoru průvlatu laserem.

Nejpoužívanějším způsobem opracování tvrdokovových průvleků je mechanické broušení obr. 37 pomocí brusné jehly obr. 38, brusného prášku a brusné pasty. Pro broušení jsou většinou používány speciální brusná dia vřetena válcového nebo kuželového tvaru s diamantovým práškem na povrchu anebo prášky z karbidu boru a křemíku.



Obr. 37 Brusné jehly [41]



Obr. 38 Technologie broušení průvleků [8]

Pro další zlepšení užitných vlastností je možné průvlekы povlakovat. Obecně je pozornost výrobců pro zlepšení vlastností zaměřena na dvě varianty.

- zlepšení jakosti WC legujícími přísadami (Ta, Ti, Ni, Mo),
- dodatečné povrchové úpravy difúzními pochody (boridování, nitridování).

Nejlepších výsledků bylo prozatím dosaženo v ČR boridováním a nanášením nitridu titanu. Boridování je difúzní pochod, kterým se kovové i nekovové povrchy nasycují borem. Boridování je adekvátní známým postupům jako je např. nitridování, cementování aj. Všechny tyto postupy jsou aplikovány za účelem zlepšit vlastnosti povrchu materiálu zvýšením jejich odolnosti proti opotřebování, u průvleku také ke snížení koeficientu tření. Průměrná životnost boridovaných TKP průvleků při tažení drátu průměru 0,22 až 0,28 mm pro pomosazené ocelové kordy byla v porovnání s TKP průvlekы 7,4 – krát větší.

Při tažení ocelového drátu dochází k opotřebování průvleků. Velikost opotřebování průvleků je teoreticky definována přírůstkem průměru taženého drátu, ke kterému dojde při tažení předem stanovené délky drátu a je vyjádřena poměrem $\mu\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$. Tím je dáno, že životnost průvleků je vyjádřena v $\text{km}\cdot\mu\text{m}^{-1}$. Průvlek, který má průměr otvoru tak velký, že je mimo používané tolerance tažení je v praxi označován jako průvlek opotřebovaný. Metoda opravy je volena dle způsobu a velikosti opotřebování průvleku.

4 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ [19],[20],[21],[22]

Znalost probíhajících deformačních mechanismů v konkrétním procesu tváření je klíčová. Při absenci znalosti vlivu proměnných např. tření, materiálové vlastnosti, geometrie nástrojů na mechaniku procesu, je nemožné správně stanovit tvar nástrojů a konfiguraci strojů, případný předpoklad vzniku defektů a vývoj mikrostruktury. Z provozních (poloprovozních) experimentů či z fyzikálního modelování prakticky nikdy nedokážeme stanovit přesné časové průběhy termomechanických veličin. Jejich šíření např. po průřezu výrobku pak nejsme schopni stanovit téměř v žádném případě.

Inženýrské a matematicko-fyzikální problémy je možné řešit výpočtovým přístupem. Ten zahrnuje numerické a analytické metody. Analytické metody poskytují přesné řešení. Zkoumají těleso jako celek a snaží se najít funkci popisující závislost mezi vstupními a výstupními parametry. Problém nastává v jejich aplikaci na komplexní úlohy. V případě složité geometrie, zatížení nebo materiálových vlastností vede k řešení parciálních diferenciálních rovnic. Proto je obvykle vhodnější využít numerické metody. Jejich řešení je přibližné, ale jeho přesnost je pro použití dostačující. Numerický přístup rozděluje těleso na menší části a vyhodnocuje jejich chování při zatěžování. Jednou z metod, která využívá numerický přístup v praxi je metoda konečných prvků.

4.1 Metoda konečných prvků [19],[20],[21],[22]

V současné době je metoda konečných prvků považována za nejefektivnější numerickou metodu řešení problémů. Pojmenování metody vyzdvihuje skutečnost, že základním stavebním kamenem je prvek konečných rozměrů, který vychází z představy rovnováhy na nekonečně malém elementu.

Aplikační možnosti MKP vedly k razantnímu vývoji programů pro řešení široké škály technických a vědeckých úloh. Výhoda oproti klasickým metodám např. metoda sítí je ta, že metoda konečných prvků dovoluje dokonale popsat vyšetřovanou oblast. Pro teoretickou numerickou analýzu je výhodné, že se MKP většinou opírá o fyzikální variační principy. Tato skutečnost umožňuje využití efektivních nástrojů analýzy a nevyžaduje dodatečných předpokladů na vyšší hladkost řešení.

Diskretizace, při řešení problémů potřebujeme většinou najít takové proměnné, jako jsou např. teplota, tlak, posunutí, napětí, aj., které jsou funkcí souřadnic x , y , z . V případě přechodných či nestálých úloh jsou však tyto veličiny funkcí nejen souřadnic x , y , z , ale také času t .

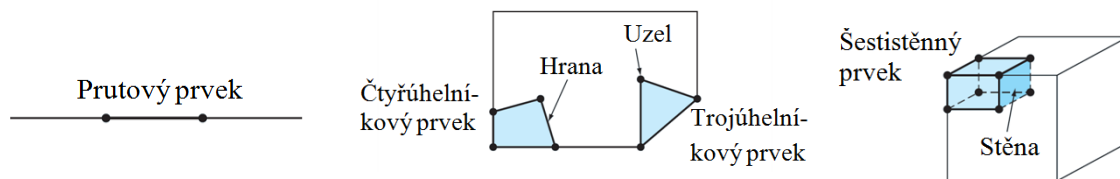
Geometrie problému je dost často nepravidelná. Rozdělení určitého mechanického systému (nosníku, rámu...) na konečný počet prvků většinou geometricky jednoduchých (úsečka, trojúhelník, obdélník) je základním krokem metody konečných prvků.

Když si tedy systém rozdělíme na prvky, vybíráme za determinující jen ty body konstrukcí, které se vyskytují v rozích prvků, koncových bodech, uprostřed hran, ploch atd. V těchto uzlech vypočítáme prvotní neznámé veličiny a z nich odvozeně druhotné. Ze známých fyzikálních veličin uzlových hodnot jednoho prvku pak můžeme určit jakoukoliv veličinu libovolného bodu prvku.

4.1.1 Tvar, velikost a počet prvků [19],[21]

Tvar, velikost i počet prvků je nutno volit tak, aby zkoumaná oblast byla rozdělena co nejlépe, tzn. aby byla nasítována co nejvíce vhodněji zkoumanému modelu.

Základní typy prvků, viz. obr 39 můžeme dělit podle dimenze výpočtu nebo podle počtu uzlů. Do dělení dle dimenze patří 1D prvek (prutový), 2D prvek (plošný), 3D prvek (tělesový). Základními typy prvků dle počtu uzlů jsou lineární a kvadratické prvky. Uvedené prvky je možné v daných dimenzích různě kombinovat a tím dosáhnout neoptimálnějšího popisu zkoumané geometrie. Každý prvek se skládá ze základních entit, tedy z uzlů, hran, případně stěn.



Obr. 39 Základní typy prvků [21]

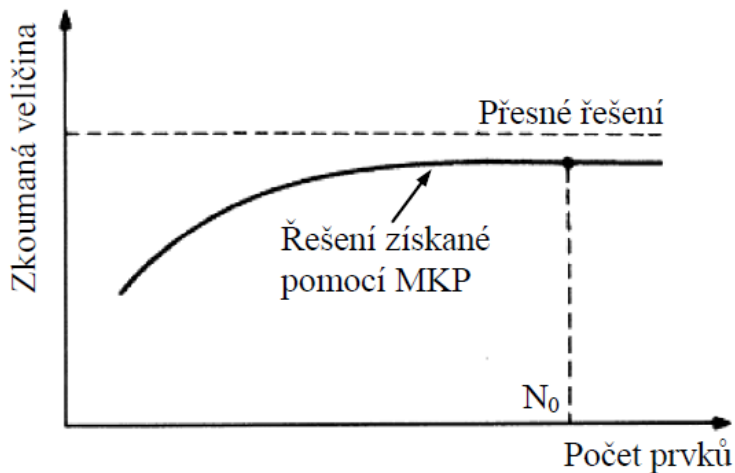
Geometrii síťované oblasti často udává tvar elementu. Tyčové prvky lze použít, jestliže je možné popsat geometrii, materiálové vlastnosti a výsledné proměnné jedinou souřadnicí. Těchto elementů můžeme použít pro modelování šíření teploty tyčí nebo modelování deformace tyče při osovém zatížení. Tyto prvky jsou většinou znázorňovány jako úsečky, přestože mají určitý příčný průřez.

2D elementů lze využít v případě, že konfigurace a další vlastnosti řešeného problému lze popsat dvěma nezávislými souřadnicemi. Trojúhelníkový prvek je základním prvkem využívaným ve 2D analýze. Ze dvou nebo čtyř trojúhelníkových prvků může být vytvořen prvek čtyřstranný a z něj následně odvozen prvek čtvercový.

3D prvky je nutno použít v případě, že vlastnosti jsou funkcí tří souřadnic. Pro tyto 3D sítě je většinou základním prvkem čtyřstěn. Při výpočtu určitých úloh je možné použít šestistěn složený z pěti trojbokých jehlanů.

Konvergence řešení je přímo ovlivněna velikostí, a proto musí být určeny s rozvahou. Čím je velikost elementů menší, tím přesnější se očekává řešení. Menší velikost elementů, a tudíž jejich větší počet způsobuje zvětšení času nutného pro výpočet. Z tohoto důvodu jsou využívány elementy různých velikostí ve stejném objemu. Menší nasíťování je tedy používáno v místech, kde se očekává větší gradient proměnné.

Nutný počet prvků k diskretizaci je v souvislosti s žádanou přesností, rozměrem prvků a zahrnutým počtem stupňů volnosti. Více prvků většinou dává přesnější řešení, ale pro všechny problém je konečný počet uzlů N_0 , nad kterým se už přesnost řešení nezvyšuje viz obr.40.



Obr. 40 Závislost počtu prvků na dosažené přesnosti [21]

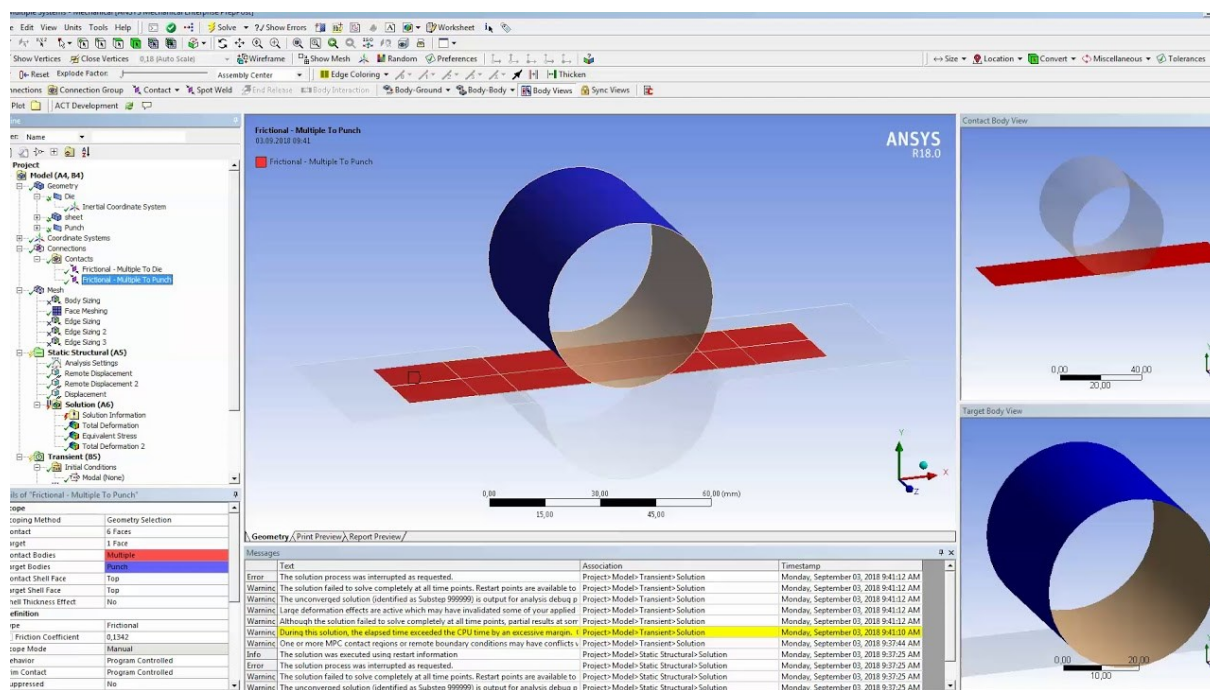
4.2 Ansys [19],[21],[24]

Ansys viz obr. 41 je obecně nelineární program, který umožňuje různé typy analýz od strukturální a termodynamické až po analýzu proudění kontinua nebo akustickou analýzu. Analýzy lze provádět jednotlivě nebo je lze sloučit do jedné, komplexní analýzy. Výpočtové modely jsou parametrické, což jednoduše umožňuje řešit i citlivostní a optimalizační analýzy.

Správnost řešení se odvíjí, jak od schopnosti správně převést konkrétní problém z reálného světa do matematického modelu, tak i od správného nastavení podmínek pro konkrétní matematické řešení, které je spojeno především s kvalitou sítě.

V pozadí modelu je při výpočtu síť konečných prvků. Na rozdíl od ostatních výpočtových programů, používá Ansys množství různých druhů konečných prvků, které mají za úkol co nejlépe postihnout skutečné chování modelovaných úloh. U 3D objemových těles je síť tvořena objemovými prvky, kvadratickými tetraedry nebo hexaedry. Na 2D objemová tělesa jsou použity kvadratické trojúhelníky nebo čtyřúhelníky. Plošná tělesa (jeden rozměr je mnohem menší než dva zbývající) jsou modelována pomocí prostorových ploch a generovaná síť je z lineárních čtyřuzlových elementů.

Ansys je tedy simulační program pro modelování nelineárních problémů a umožňuje definovat vlastní materiál včetně zadání konstant všeho druhu od jednoduchých fyzikálních (délková teplotní roztažnost, hustota) až po obtížně měřitelné.



Obr. 41 Prostředí simulačního programu Ansys [43]

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jak již bylo v úvodu práce popsáno, práce řeší problém se zaváděním drátu do dvojitého průvlastku tažného zařízení Shumag obr. 42a. Tato jednotka je původně zkonstruována pro tažení drátu přes jeden průvlastek. Z důvodu výroby nedokonalých výrobků, co se týče ovality a průhybu drátu, se firma rozhodla vyzkoušet tažení přes dva průvlastky, které by jim měly zajistit asi o 10 % menší zmetkovitost než při tažení drátu přes jeden průvlastek.



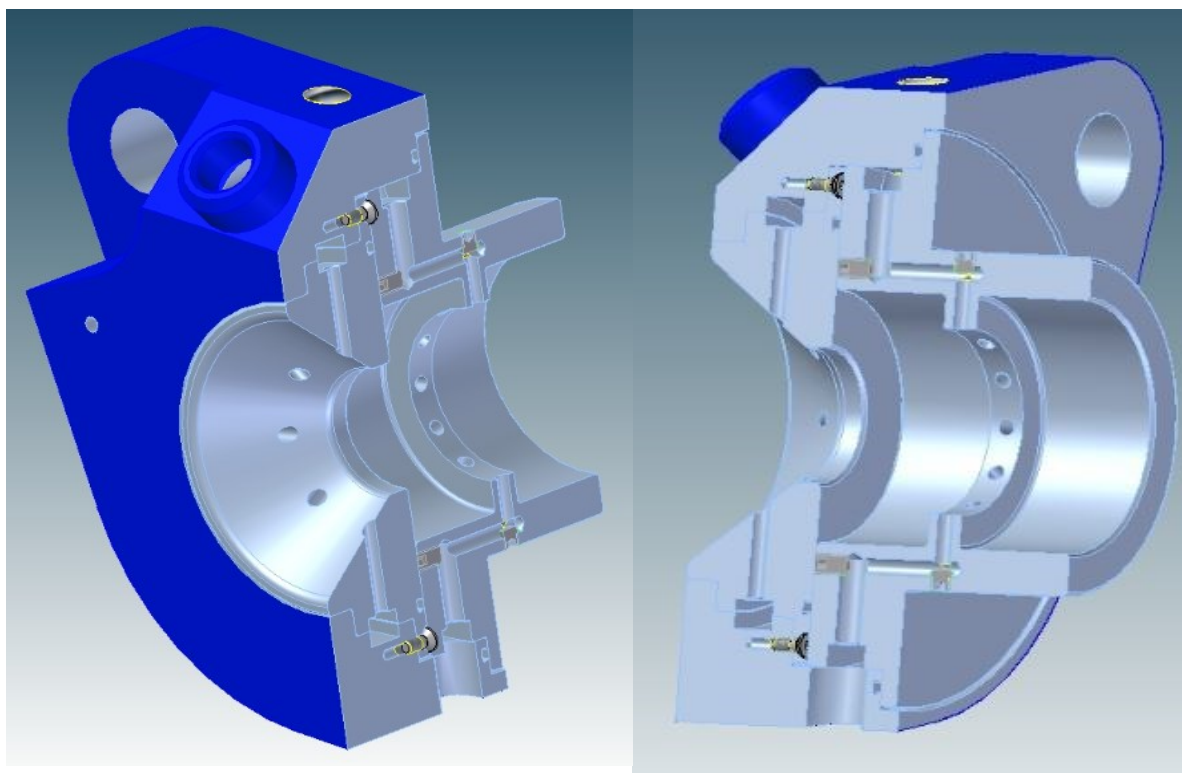
a) tažné zařízení Schumag



b) tělo tažného zařízení

Obr. 42 Drátotah [30]

Pro aplikování tažení přes dva průvlastky bylo nutné vyrobit speciální přípravek, který umožňuje aplikaci dvou průvlastků do stroje Schumag. Tento přípravek viz obr.43 je zkušební prototyp a je vložen do těla tažné stolice viz obr. 42b, místo jednoho průvlastku.



Obr. 43 Přípravek pro uložení dvou průvlastků do drátotahu

Aby bylo možné použít tento prototypový přípravek, bylo nutné použít průvlastky, které mají menší průměr objímky a také bylo nutné snížit výšku objímky, aby se do přípravku vlezly. Na tomto prototypovém přípravku byly vyrobeny mazací kanály, které zabezpečují mazání obou dvou průvlastků.

Při prvotních zkouškách tažení přes dvojité průvlastky s materiálem CK 67 o průměru 14 mm došlo ke vzpříčení zaváděného drátu. Při klasickém tažení přes jeden průvlastky k těmto problémům nedochází. Aby bylo možné tažení přes dvojité průvlastky odzkoušet, bylo nutné začátek tohoto drátu upravit na hrotovacím zařízení jiného tažného stroje, který firma vlastní. Tažná stolice Schumag hrotovací zařízení nemá, jak již bylo zmíněno.

Zaváděcí zařízení tažné stolice Schumag, viz obr. 44, je zkonstruováno z hydraulicky ovládaných zaváděcích čelistí, které jsou schopny pohybu v rozmezí od 70 mm do 300 mm od čela průvlastku.

Toto zařízení je ovládáno poloautomaticky, pracovník za pomoci elektroniky ovládá hydraulický systém, který pohybuje s čelistmi a tlačí drát do průvlastku. Rychlost pojezdu je pevně nastavena a pracovník ji nemůže měnit. Proměnný parametr, který obsluha ovládá je krok čelistí, tuto vzdálenost může obsluha subjektivně ovládat a měnit, takže se délka drátu mezi čelistmi a průvlastkem mění. Drát se při tažení přes jeden průvlastky zavádí do průvlastku na několik přechytnutí, aby nedošlo k jeho vybočení a ke ztrátě vzpěrné stability viz obr. 45. Při tažení drátu přes dva průvlastky je síla, kterou musí drát při zavádění překonat větší, tudíž se zavedení bez úpravy konce drátu nepodařilo.

Při tažení se používá tažné mazivo Umformoel 80M olej pro tváření kovů. Je to vysoce výkonná, vodou nemísitelná chladicí kapalina na bázi speciálně rafinovaného ropného základového oleje. Je určena především ke stříhání (ražení), tažení, vysekávání a beztržskému tváření dílů z konstrukčních, legovaných i vysoce legovaných ocelí.

Umformoel 80M je vhodný i jako přísada pro běžně používané oleje, pokud je potřeba zvýšit jejich výkon nebo doplnit aditiva ztracená v průběhu použití např. výnosem na zpracovávaných dílech. Vysoká výkonnost produktu je založena na vysoké koncentraci účinných aditiv obsažených v ropném rafinátu. Použitá aditivace zajišťuje spolehlivou ochranu nástrojů i obrobků. Aktivní sloučeniny síry a fosforu obsažené v produktu mají sice sklon k zabarvování částí strojů a obrobků z mědi a jejích slitin, ale naopak ocelové součástky jsou dočasně chráněny proti korozi. Speciální přísady snižují tvorbu mlhy na pracovišti při použití těchto produktů na minimum.



Obr. 44 Vzdálenost mezi čelistmi a průvlastkem



Obr. 45 Napěchovaný drát

Toto mazivo je především určeno pro:

- Výrobky z ocelového plechu USt 14 do tloušťky plechu 3 mm, které jsou produkovány tažením až v 10 stupních, konečných rozměrů cca: průměr 70 mm, délka 100 až 150 mm.
- K vysekávání polotovarů z legovaných a nelegovaných ocelových plechů s tloušťkou menší než 3 mm.
- K vysekávání a hlubokému tažení polotovarů pro výrobu řetězců z plechů tloušťky až 7 mm z ocelí cementačních a k zušlechtnění C 10 až C 45

5.1 Zkoušky mechanických vlastností

Pro experimentální ověření i vstupní materiálové testy je nutné provést základní zkoušky mechanických vlastností. Pro tento účel byl použitý univerzální zkušební stroj ZD40 viz obr. 46 Jde o hydraulický zkušební stroj výrobce HBM/SRN, který umožňuje tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Tento stroj je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci univerzálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry jsou: měřící rozsah 8 až 400kN, chyba měření síly 1/100 jmenovitého rozsahu síly (tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1), měřící rozsah měření dráhy 0 ± 280 mm, chyba měření dráhy je $\pm 0,01$ mm, inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy.

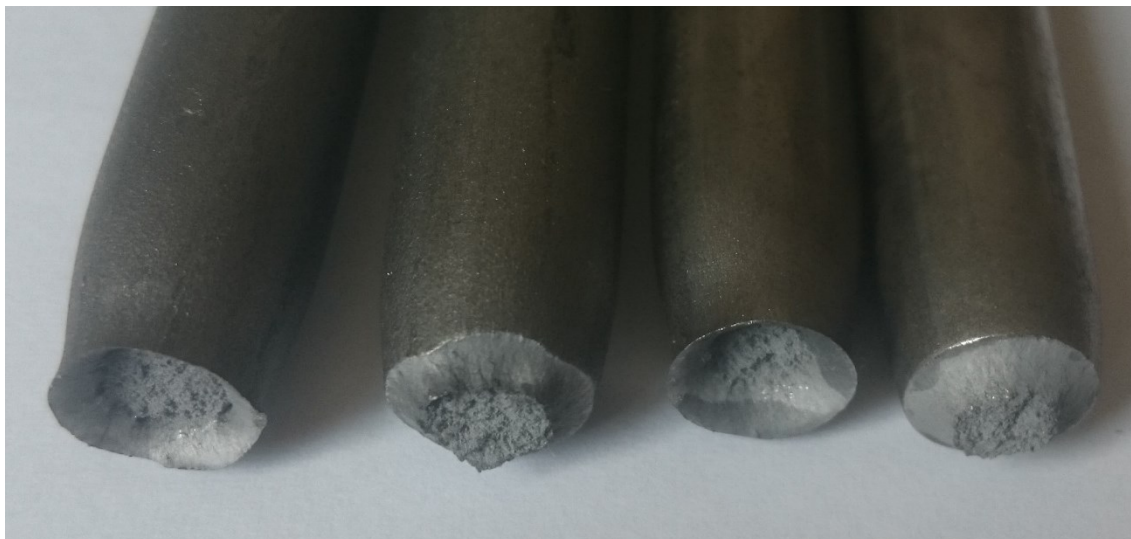
Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků a grafickým zpracováním.



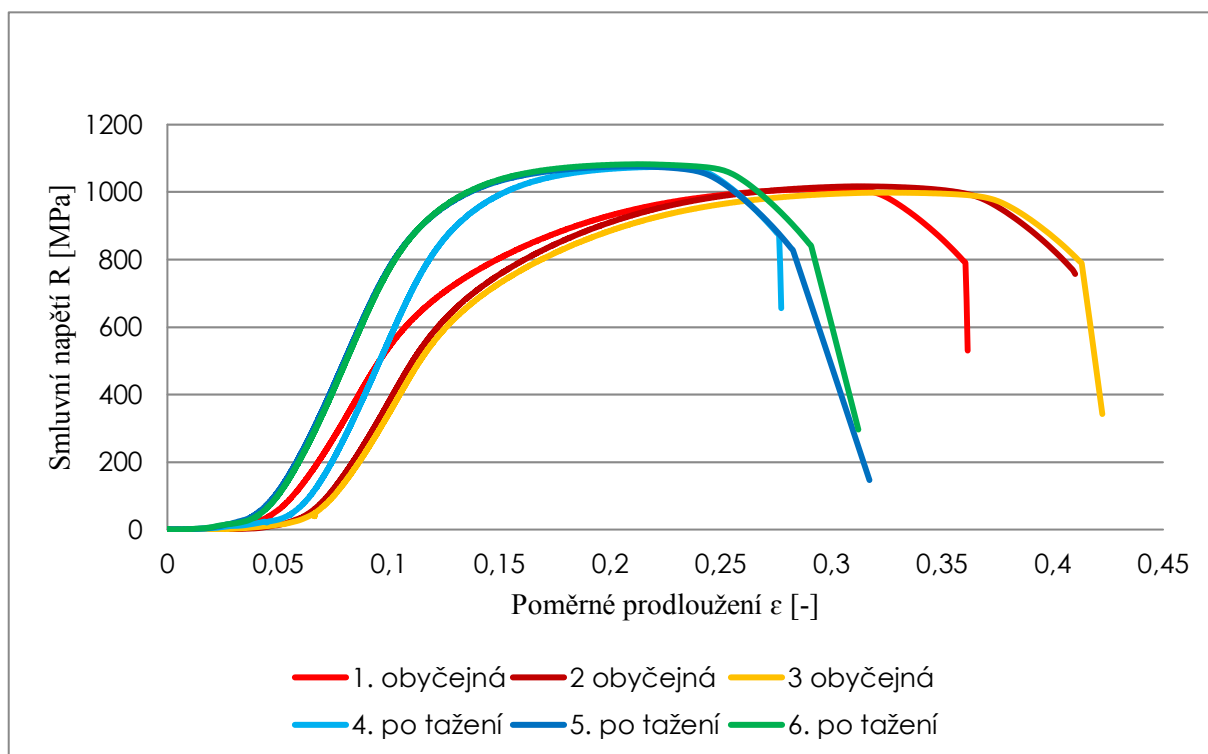
Obr. 46 Zkušební stroj ZD 40

5.1.1 Tahová zkouška

Tato zkouška byla provedena pro zjištění přibližných mechanických hodnot materiálu před a po procesu tažení. Výsledky orientační tahové zkoušky, která byla zhotovena na stroji ZD40 jsou v následujícím grafu na obr.48 a tabulce 4. Při zkoušce bylo přetrženo šest tyčí. Tři obyčejné tyče, které neprošly procesem tažení (průměr 14 mm) a tři tyče, které prošly procesem tažení (průměr 12,88). Na obr. 47 jsou vidět přetržené vzorky neprotážené tyče (vlevo) a protažené tyče (vpravo).



Obr. 47 Přetržené vzorky



Obr. 48 Graf závislosti smluvního napětí na poměrném prodloužení

Tab. 4 Naměřené hodnoty tahové zkoušky.

Vzorek	d [mm]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	T [s]
1	14	155438	639,2	1009,7	6,25	86,16
2	14	156567	643,8	1017	15,62	87,66
3	14	153670	632,2	998,2	15	85,68
4	12,88	140004	866,7	1074,5	5	91,34
5	12,88	140210	864,2	1076,1	13,75	91,96
6	12,88	141048	867,7	1082,5	11,25	92,72

V tabulce 4. je vidět, že vzorek 1. bez protažení a vzorek 2. po protažení mají výrazně menší hodnoty tažnosti než zbylé vzorky. Tento fakt byl způsoben tím, že došlo k porušení zkoušené tyče v místě mimo měřenou oblast. Materiál po procesu tažení vykazuje vyšší mez kluzu než původní materiál a také tažnost se sníží zhruba o 2 %.

5.1.2 Pěchovací zkouška

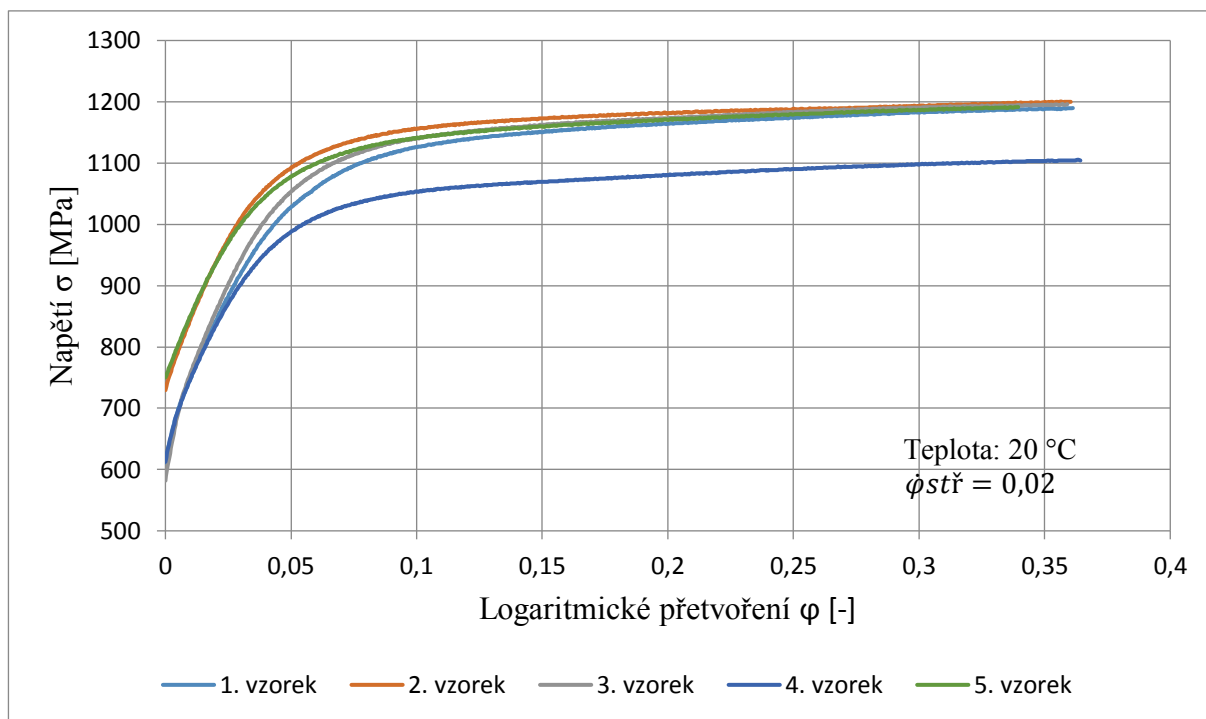
Pro zadání materiálového modelu do numerické simulace je ovšem vhodnější namísto tahové zkoušky provést zkoušku pěchovací, a to kvůli převládající tlakové napjatosti během procesu zavádění drátu.

Pěchovací zkouška byla opět provedena na zkušebním zařízení ZD 40 na pěti zkušebních vzorcích viz obr. 49. Zkušební váleček byl vyroben ze zkoušeného materiálu CK 67 a měl 10 mm průměr a 20 mm výšku. Zkouška probíhala za pokojové teploty (20 °C). Při zkoušce byla změřena počáteční a koncová velikost vzorků a průběh zatěžující síly na dráze.



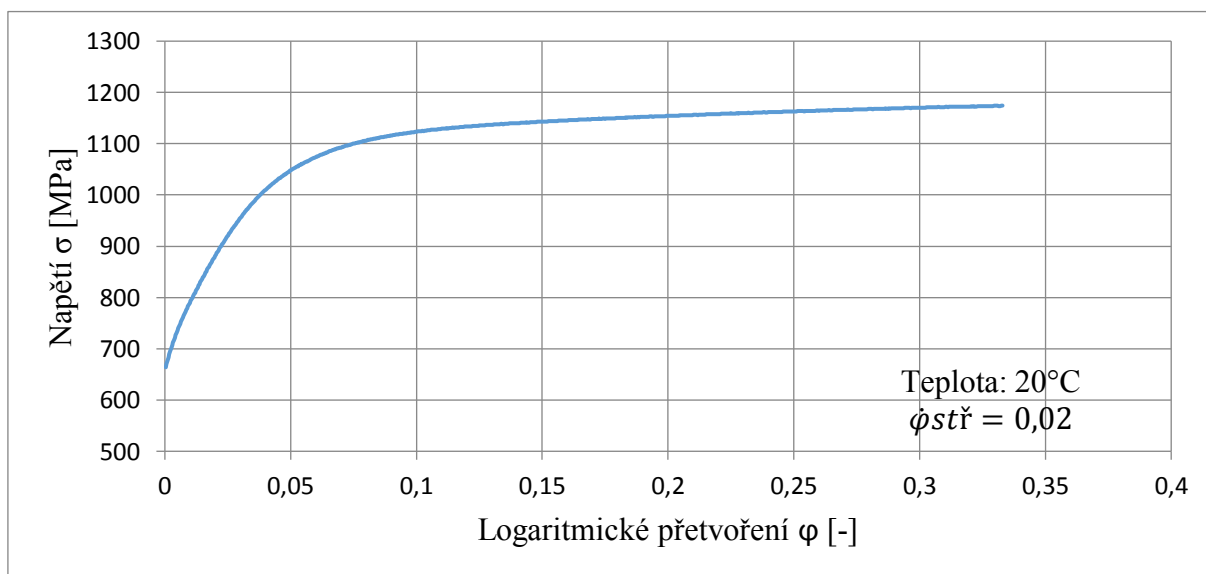
Obr. 49 Spěchované vzorky

Zaznamenané křivky zpevnění materiálu CK 67 jsou v grafu na obr. 50.



Obr. 50 Křivky zpevnění jednotlivých vzorků

V následujícím grafu na obr. 51 je vidět průměr hodnot z jednotlivých pýchovacích zkoušek, které se následně použily pro nastavení numerické simulace.



Obr. 51 Průměrná křivka zpevnění

5.2 Teoretický výpočet

Tato kapitola se zabývá teoretickým výpočtem určení maximální délky drátu při protlačování drátu průvlakem. Protlačování drátu o průměru 14 mm se uskutečňuje dvěma za sebou řazenými průvlakem, přičemž první průvlak má průměr 13,77 mm a následující průvlak je o průměru 12,77 mm. Výpočtem se stanoví kritická délka drátu mezi místem jeho upnutí a prvním průvlakem. Výpočet vychází z předpokladu, že tato hraniční délka je určena mezním stavem, kdy při stanovené protlačovací síle dojde ke ztrátě stability protlačovaného drátu.

Při experimentálním měření bylo zjištěno, že pro protlačování drátu oběma průvlakem, je zapotřebí síla o velikosti 110 000 N, zatímco k protlačení pouze prvním průvlakem, tj. průměrem 13,77 mm je zapotřebí síla 30 000 N.

Pro teoretický výpočet maximální délky drátu byl použit vztah pro kritickou sílu, při níž dojde ke ztrátě stability:

$$F_{kr} = n \cdot \frac{\pi^2 E J_{\min}}{l^2} \quad (5.1)$$

kde: F_{kr} – je kritická síla,

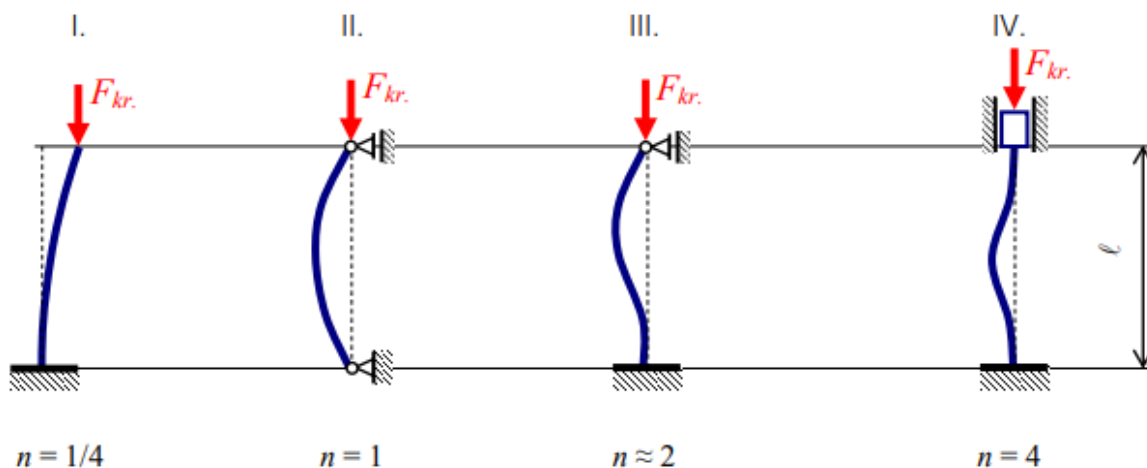
n – je koeficient pro daný typ uložení,

E – je modul pružnosti v tahu [GPa],

J_{\min} – je kvadratický moment průřezu [mm⁴],

l – je délka tyče [mm].

Koeficient n je různý pro různé základní typy uložení viz obr. 52.



Obr. 52 Typy uložení

Vzhledem k tomu, že je dána potřebná síla pro protlačení drátu průvlakem, vyjádří se z uvedeného vzorce kritická délka drátu pro jeho stabilitu:

$$l = \sqrt{n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{\min}}{F}} \quad (5.2)$$

Kde je pro daný materiál $E = 207$ GPa a $J_{\min} = 1885,7$ mm⁴, které se určí podle vzorce:

$$J_{\min} = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{\pi 14^4}{64} = 1885,7 \text{ mm}^4 \quad (5.3)$$

Drát je v jednom místě pevně uchycen do kleštin, toto uložení tedy odpovídá vetknuté vazbě. Obtížněji se stanovuje uložení na druhém konci drátu. Fakticky v praxi existují dvě varianty. Při první se nachází začátek drátu na začátku prvního průvlakem, tedy situace na začátku protlačování, a druhá, při které se drát již nachází v obou průvlakem, která tak odpovídá průběhu protlačování.

Z hlediska určení koeficientu pro typ uložení je jednodušší druhá varianta. Vzhledem k tomu, že je drát již plně provléknut oběma průvlakami, jedná se o vazbu posuvnou. Pro tuto vazbu je koeficient n vyšší než pro ostatní vazby, délka drátu tak teoreticky vychází delší, nicméně pro protlačování oběma průvlakami je taktéž větší síla. Maximální délka pro l_1 je tedy délka, při které ztratí drát stabilitu již v průběhu protlačování. Příklad protlačování drátu tedy vychází:

$$l_1 = \sqrt{n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{\min}}{F}} = \sqrt{4 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 207000 \cdot 1885,7}{110000}} = 374,3 \text{ mm}$$

Obtížnější je určení koeficientu n pro počátek protlačování. Vzhledem k tomu, že drát se nenachází v průvlakem, může se jeho konec volně natáčet, což odpovídá kloubové vazbě. Nicméně v důsledku nerovností a nepřesností vedení drátu se drát v prvním okamžiku opře o jeden bod, nikoliv celým obvodem, v tuto chvíli se drát při náběhu působící síly již ohýbá ale zároveň se v omezené míře posouvá. Vazba tedy zcela jistě neodpovídá vazbě volné, nicméně pro ilustraci je zde uveden i výpočet pro tento extrém, přičemž je nutno brát v potaz, že realita uložení se bude nacházet někde na pomezí vazby kloubové a volné. Dalším aspektem volné vazby je fakt, že je na bezpečné straně výpočtu, při uvažování délky vypočtené tímto způsobem ke ztrátě stability určitě nedojde při kratší délce drátu.

Při uvažování volné vazby na konci drátu při průchodu prvním průvlakem pak jeho kritická délka vychází:

$$l_2 = \sqrt{n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{\min}}{F}} = \sqrt{0,25 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 207000 \cdot 1885}{30000}} = 179,2 \text{ mm}$$

Pro uvažování kloubového uchycení konce drátu při průchodu prvním průvlakem pak jeho kritická délka vychází:

$$l_3 = \sqrt{n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{\min}}{F}} = \sqrt{1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 207000 \cdot 1885}{30000}} = 506,8 \text{ mm}$$

Budeme-li uvažovat volné vazby při průchodu oběma průvlakami délky budou následující:

$$l_4 = \sqrt{n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{\min}}{F}} = \sqrt{0,25 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 207000 \cdot 1885}{110000}} = 93,6 \text{ mm}$$

Budeme-li uvažovat kloubové vazby při průchodu oběma průvlakami délky budou následující:

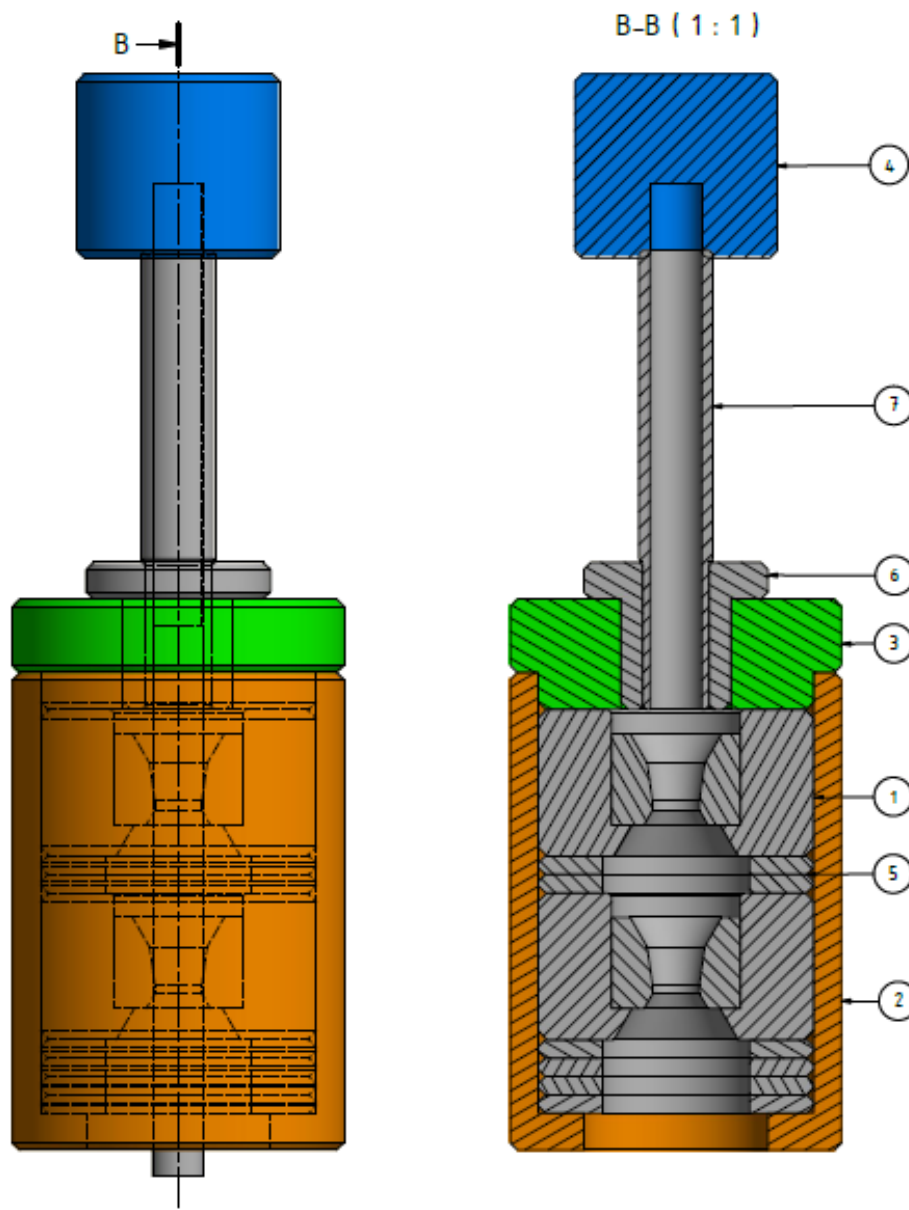
$$l_5 = \sqrt{n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{\min}}{F}} = \sqrt{1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 207000 \cdot 1885}{110000}} = 187,1 \text{ mm}$$

Jak již bylo popsáno výše, ani jeden z výpočtů přesně nereflektuje realitu. Skutečná kritická délka drátu se tedy bude nalézat někde mezi těmito hodnotami s tím, že pravděpodobně bude blíže hodnotě vypočtené při uvažování kloubového uložení.

Ačkoliv je výpočet pro maximální délku drátu v průběhu protlačování poměrně věrný realitě, ani jedno uložení pro počátek protlačování neodpovídá skutečnému uložení drátu v tažné stolici. Výpočty jsou tedy jen orientační. Navíc výsledek pro první případ se nachází mezi stanovenými rozsahy pro případ druhý. Z uvedených výpočtů se tedy nedá přesně určit maximální přípustná délka drátu. Proto byla pro další zkoumání zhotovena simulace a praktický experiment.

5.3 Experimentální ověření

Na základě materiálů, které byly pro experiment poskytnuty, dráty o průměru 14 mm z materiálu CK 67, tažné průvlaky o průměrech 13,77 mm a 12,77 mm a výkresy tažných průvlaků, byl v programu Autodesk Inventor navržen model viz obr 53. demonstračního přípravku.



1 - průvlak; 2 - tubus; 3 - víko tubusu; 4 - tlačné víčko; 5 - distanční kroužek;
6 - vložka; 7 - vodící pouzdro

Obr. 53 Model přípravku

Stěžejní částí přípravku je pouzdro „2“ do kterého jsou vloženy distanční kroužky „5“ a průvlaky „1“, pouzdro je nahoře uzavřeno víkem „3“ a ve víku je vložen středící element „6“ do kterého je zasunuto vodící pouzdro „7“. Drát je tedy posouván přes vodící pouzdro směrem k průvlakům, do nichž je postupně zaváděn a shora je veden horním vodícím pouzdrem „4“.

Pro samotný experiment byl vyroben dle navrženého modelu přípravek viz obr. 54 pro realizaci experimentu. Dále bylo preventivně vyrobeno více vodících pouzder, s různými délkami z důvodu obavy napěchování vzorku ve vodícím pouzdře.

Přípravek je navržen tak, aby dovoloval měnit vzdálenost jak mezi průvlaký, tak i vzdálenost prvního průvlaků od vodícího pouzdra. Tento přípravek simuluje zaváděcí hydraulické čelisti (vodícím pouzdrem), které jsou součástí zkoumaného zařízení. Přípravek je použitelný pro všechny průměry průvlaků, co se na zkoumaném tažném zařízení používají.

Aby bylo možné opakovat zkoušky, bylo zapotřebí zavedený drát z průvlaků vždy vytlačit, aby mohl být zaveden další vzorek. Pro vytlačování zavedeného drátu z průvlaků byly použity kalené tyče. Tyto tyče měly průměr 12,50 mm, aby prošly přes kalibrační očko a nedošlo k jejich napěchování v průvlaků.



a) celkový pohled



b) rozložený přípravek

Obr. 54 Demonstrační přípravek

5.4 Experiment

Praktická zkouška byla dělána na hydraulickém zkušebním stroji ZD40. Tento praktický experiment měl za úkol ověřit výsledky výpočtu a posloužit jako podklad pro simulace. Zkouška proběhla na několika zkušebních vzorcích (drátech), které se lišily pouze délkou materiálu, průměr byl u všech stejný. Všechny zkoušky protlačování drátu průvlakem probíhaly za pokojové teploty (20 °C) a při stejné rychlosti (170 mm/min) posuvu beranu zkušebního zařízení. Všechny zkoušky probíhaly s mazacím olejem Umformoed 80M, který je používán při zavádění a tažení drátu na zkoumaném stroji Schumag. Mezi čely průvlaků byl vložen distanční kroužek o celkové výšce 10 mm. Tato výška odpovídá skutečné vzdálenosti průvlaků v tažném zařízení.

Při prvním pokusu byly zkoumány tři vzorky, jak je vidět z grafu na obr. 56. Při tomto pokusu byl drát zaváděn konstantní rychlostí bez přerušení za pomoci vodícího pouzdra, které bylo vzdáleno od čela průvlaků 10 mm. Křivky znázorňují zavádění drátu napřed do prvního průvlaků průměru 13,77 mm následně do druhého průvlaků o průměru 12,77 mm. Síla potřebná k protlačení prvním průvlakem je u všech tří případů okolo 21 kN. Při zavedení drátu do druhého průvlaků vzrostla síla na cca 100 kN. Měření číslo 1 viz obr. 55 a) bylo provedeno s drátem, který byl sice uložen ve vodícím pouzdře, ale po zavedení prvním průvlakem a kontaktu s druhým průvlakem došlo k prohnutí drátu nad vodícím pouzdrům. Po protlačení do prvního průvlaků byla volná délka drátu cca 170 mm. Tato délka byla měřena mezi spodním a horním vodícím pouzdrům. Pro měření číslo 2 a 3 viz obr. 55 b) byly použity vzorky o celkové délce 150 mm. Zavedení těchto drátů do průvlaků už proběhlo bez problémů.

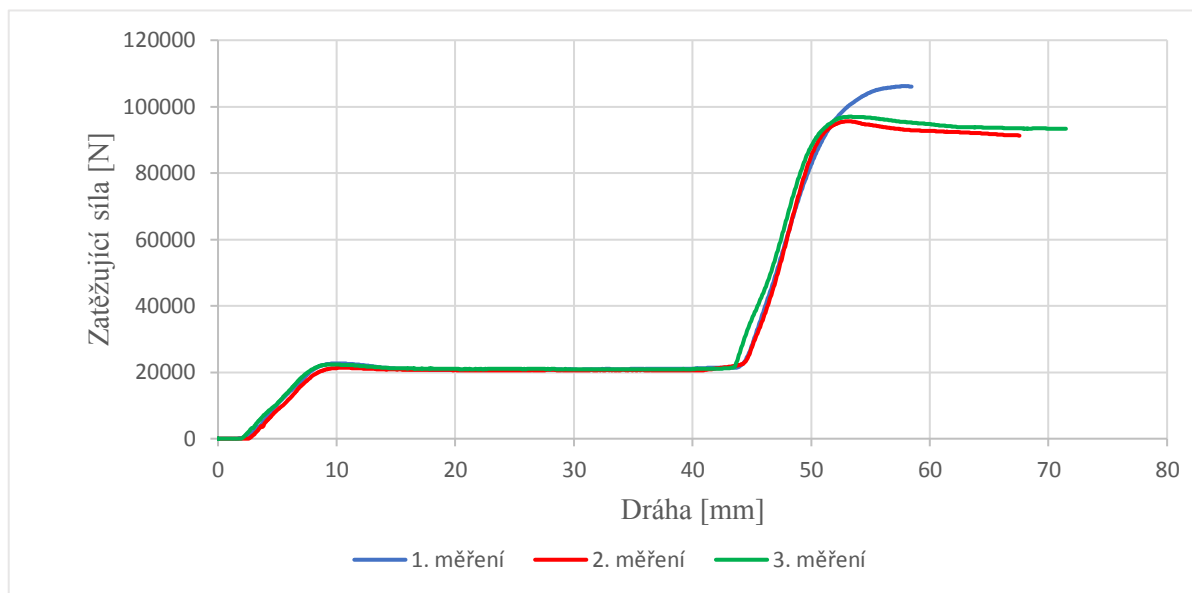


a) měření číslo 1



b) měření číslo 2

Obr. 55 Zavádění drátu do průvlaků



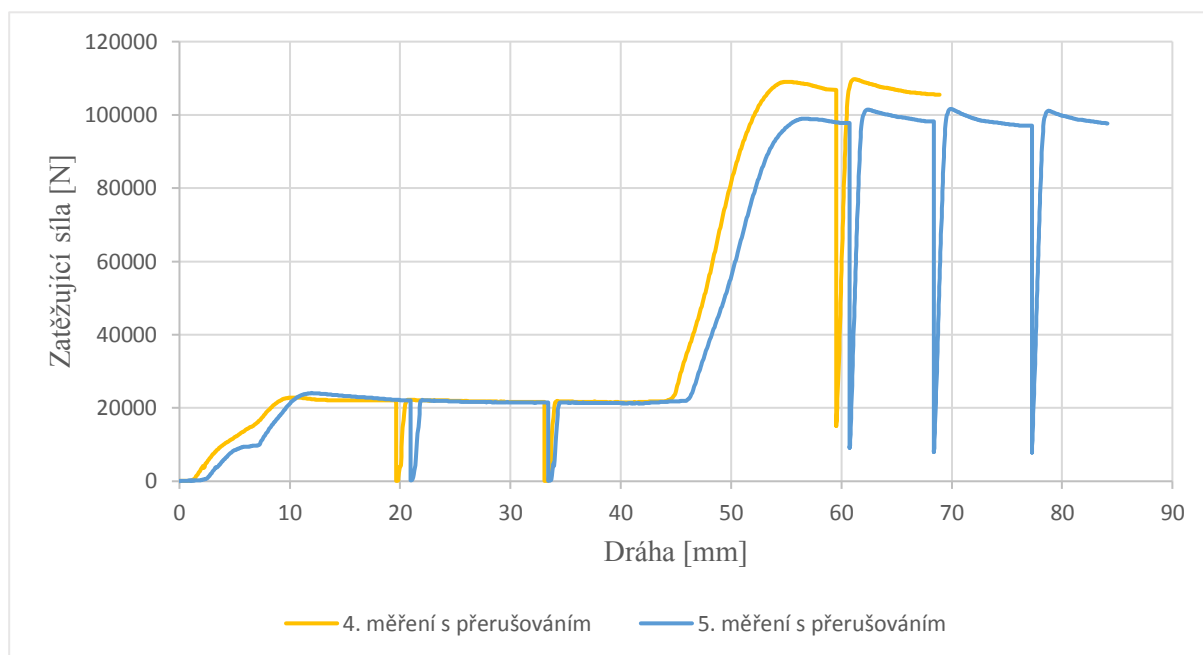
Obr. 56 Závislost síly na dráze při zavádění drátu s vedením

Výsledný protlačený drát, který odpovídá druhé křivce je zobrazen na obr. 57. Jak je vidět z obrázku, drát prošel oběma průvlaky, aniž by došlo k jeho vybočení.



Obr. 57 Zavedený drát do průvlaků

Druhý pokus se vzorky číslo 4 a 5 byl proveden s dráty o stejné celkové délce 150 mm. Vzdálenost vodícího pouzdra od čela prvního průvlaků byla také 10 mm. Při tomto pokusu bylo nasimulováno přerušované zavádění. Toto přerušované protlačování odpovídá skutečnosti, protože při zavádění drátu jsou hydraulické kleštiny ovládány poloautomaticky a dráhu posuvu čelistí určuje obsluha stroje. Rychlost posuvu čelistí je neměnná, tudíž byl zkušební stroj nastaven na přibližně odpovídající konstantní rychlost.

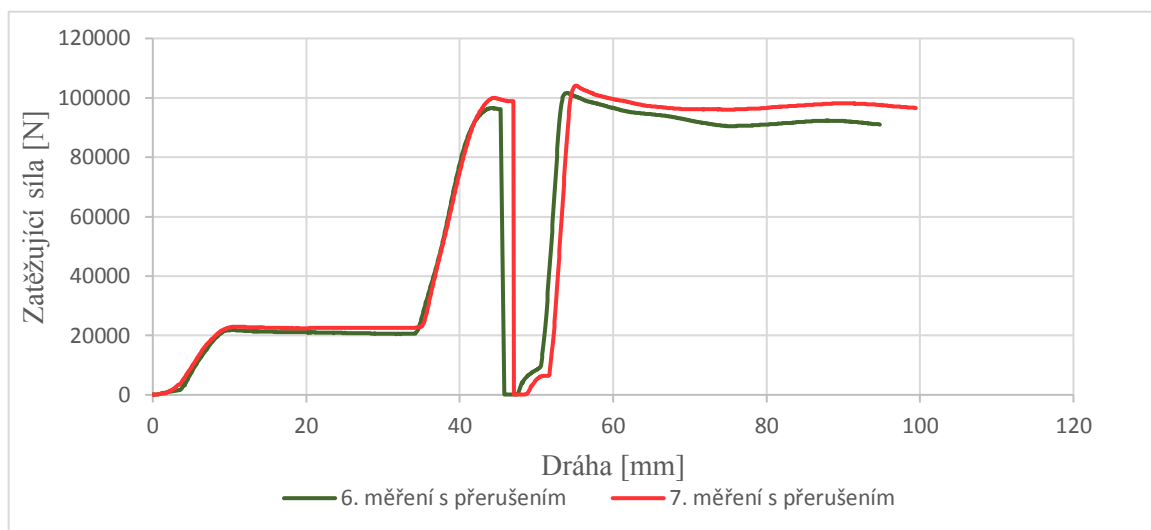


Obr. 58 Závislost síly na dráze při zavádění drátu s přerušováním

Jak je z grafu na obr. 58 patrné, přerušované zavádění nemá mezi prvním a druhým průvlakem téměř žádný vliv, protože nárůst síly je téměř nezatelný. Při přerušovaném zavádění u druhého průvlaku již dochází k výraznějšímu zvýšení síly cca o 8 % oproti měření č.5. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena překonáváním statického tření mezi drátem a průvlakem.

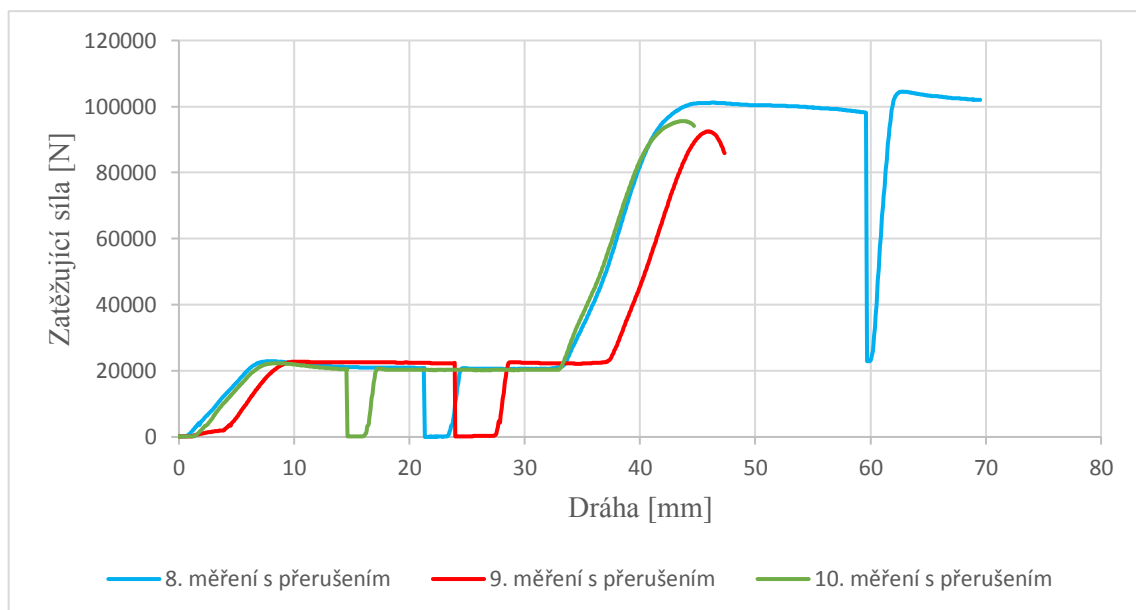
V grafu na obr. 59 je znázorněn pokus číslo 3 se vzorky 6 a 7, který proběhl se zavedením drátu do průvlaků za pomoci vodícího pouzdra. Toto pouzdro bylo použito pro dosažení alespoň částečné kolmosti drátu. Po zavedení do prvního průvlaku bylo toto vodící pouzdro odstraněno a drát byl dále zaváděn do průvlaků za absence vedení. Zkoušený vzorek číslo 6 měl délku od čela průvlaku po horní pouzdro 100 mm. U vzorku číslo 7 byla použita délka drátu 120 mm. Při tomto pokusu bylo zjištěno, že drát z materiálu CK 67 s průměrem 14 mm projde přes oba průvlakem, a tudíž neztratí vzpěrnou stabilitu. Z toho plyne, že je možné jej při těchto délkách do průvlaků bez problémů zavádět.

Při pokusech 1 až 3 byla zkoumána síla a její nárůst při různých režimech zavádění materiálu, která běžně při zavádění drátu nastává. Z experimentu je zřejmé, že vzdálenost 10 mm mezi průvlakem ani přerušování zavádění nemají významný vliv na zavádění drátu.



Obr. 59 Závislost síly na dráze při zavádění drátu bez vedení

V pokusu číslo 4 byla sledována kritéria na vybočení, resp. délka drátu před průvlakem. Z důvodu zajištění kolmosti drátu bylo pro zavedení do prvního průvlastku použito opět zaváděcí pouzdro a po zavedení do prvního průvlastku bylo toto pouzdro odstraněno. V grafu na obr. 60 je patrné, že byly provedeny 3 pokusy. U všech tří pokusů bylo použito pro zavedení do prvního průvlastku vodící pouzdro, drát u vzorku číslo 8 měl délku 135 mm mezi čelem průvlastku a horním pouzdem. Drát číslo 9 měl po zavedení délku 170 mm nad průvlakem a drát s číslem 10 byl dlouhý 155 mm. Z grafu je vidět, že drát číslo 8 byl protlačen přes oba průvlastky s přerušením a k jeho vybočení nedošlo. Dráty číslo 9 a 10 při pokračování zavádění do druhého průvlastku bez vodícího pouzdra vybočily a došlo k jejich ohnutí, což je vidět na obr. 60 v grafu na poklesu síly na dráze cca 45 mm.



Obr. 60 Závislost síly na dráze při zavádění drátu bez vedení

Při posledním pokusu bylo zjištěno na základě předpokladů, že zkoumaný drát délky 135 mm bezpečně projde oběma průvlastky, aniž by došlo k jeho vybočení a ztrátě vzpěrné stability. Mezi délkou drátu 135 až 155 mm je výsledek nejistý, protože zde zasahuje velké

množství různých faktorů, které významně ovlivňují proces zavádění drátů do průvlaků. Např. zaváděné dráty se liší přímostí a různě zastřiženým koncem. Tyto vlastnosti ovlivňuje obsluha tažného zařízení. Při zavádění drátu obsluha napřed navede drát mezi „předrovnací“ rolny, za pomoci natahovacího zařízení. Toto zařízení při natahování mezi rolny většinou ohne konec drátu. Pro zavedení drátu do tryskacího zařízení a následně do průvlaků musí být ohnutý konec odstrižen. Stříhání je prováděno pomocí hydraulických nůžek, které jsou ovládány ručně. Geometrie odstriženého drátu se může nepatrně lišit, protože pracovník nemusí pokaždé přiložit nůžky k drátu stejně. Následně drát projede přes rovnací rolny, které jsou seřizovány také pracovníkem. Z tohoto důvodu je přímost drátu rozdílná.

Pokus nám dále potvrdil, že při délce drátu nad 155 mm dojde vždy k vybočení a ztrátě vzpěrné stability.

Na obr. 61a jsou vidět jak dráty protlačené, tak dráty ohnuté (neprotlačené vzorky). Vzorek číslo 9, u kterého nedošlo k protlačení je vidět také na obr. 61b. Dále je vidět tlačné víčko a přípravek pro uložení průvlaků.



a) vzorky po zkoušce



b) zpříčený drát

Obr. 61 Protlačovací zkouška

5.5 Simulace

Numerická simulace byla vytvořena v programu Ansys Workbench 18.2. Pro simulaci byly použity modely průvlaků, které byly vymodelovány na základě dodané výkresové dokumentace. Do simulace byla dále zahrnuta i geometrie drátu, která vzniká na jeho konci po odstrižení viz obr. 62. Geometrický model viz obr. 63 byl vytvořen jako plný 3D model. Pro

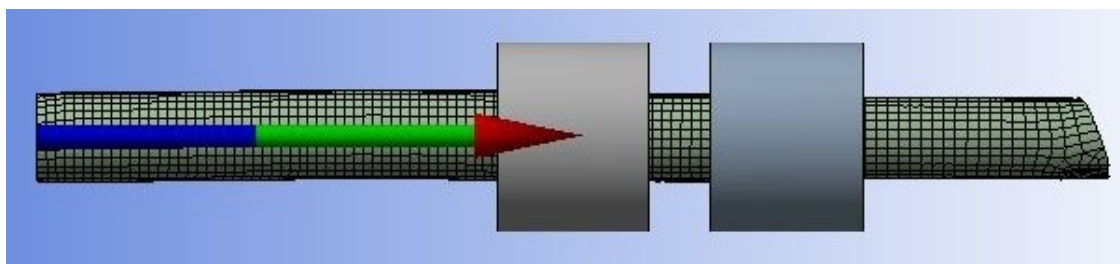
diskretizaci bylo použito 3D elementů (hexaedrů, tetraedrů). Průvlaky byly uvažovány jako ideálně tuhá tělesa, tudíž byla diskretizována pouze hranice mezi drátem a průvlaky.

Vlastnosti materiálu byly nastaveny dle získaných parametrů z pěchovací a tahové zkoušky, které byly provedeny před samotným simulováním protlačování. Simulace byla nastavena pro všechny zkoumané varianty stejně, lišila se pouze geometrie, a to konkrétně délka drátu. Pro koeficient tření „f“ byla zadána hodnota 0,07. Posuv drátu v průvlacích byl nastaven na 100 mm.



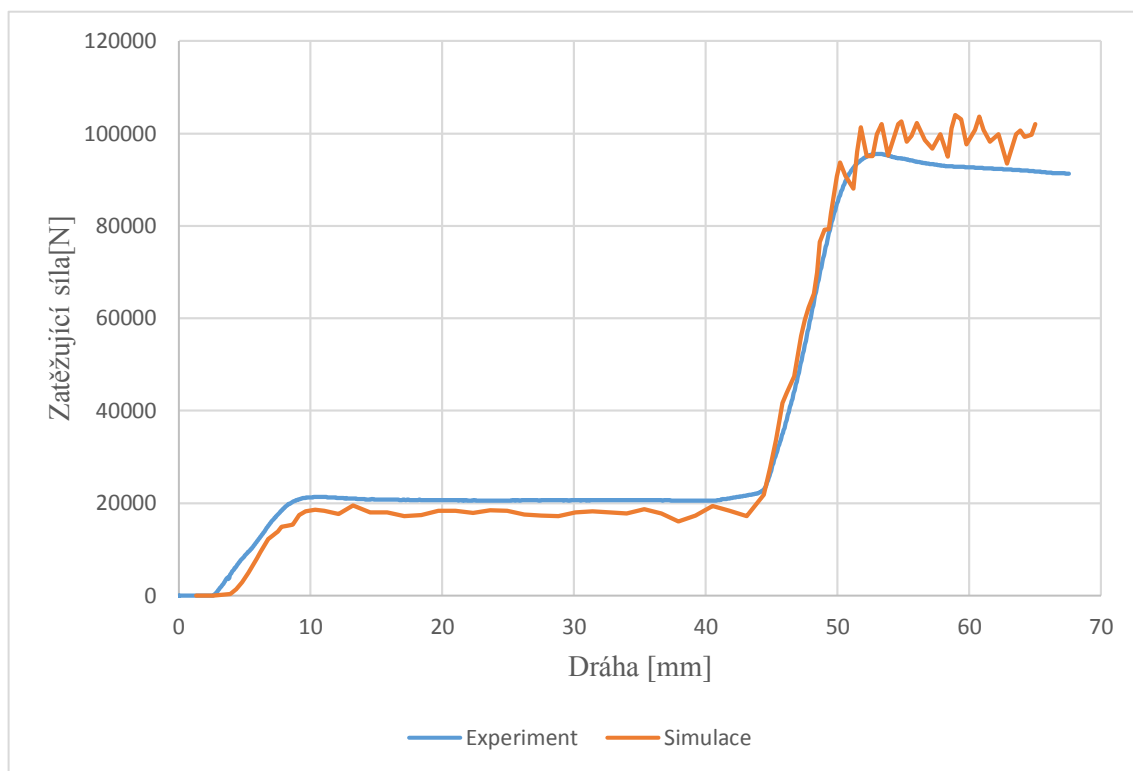
Obr. 62 Konce drátu po odstřižení

Geometrický model:



Obr. 63 Geometrický model simulace

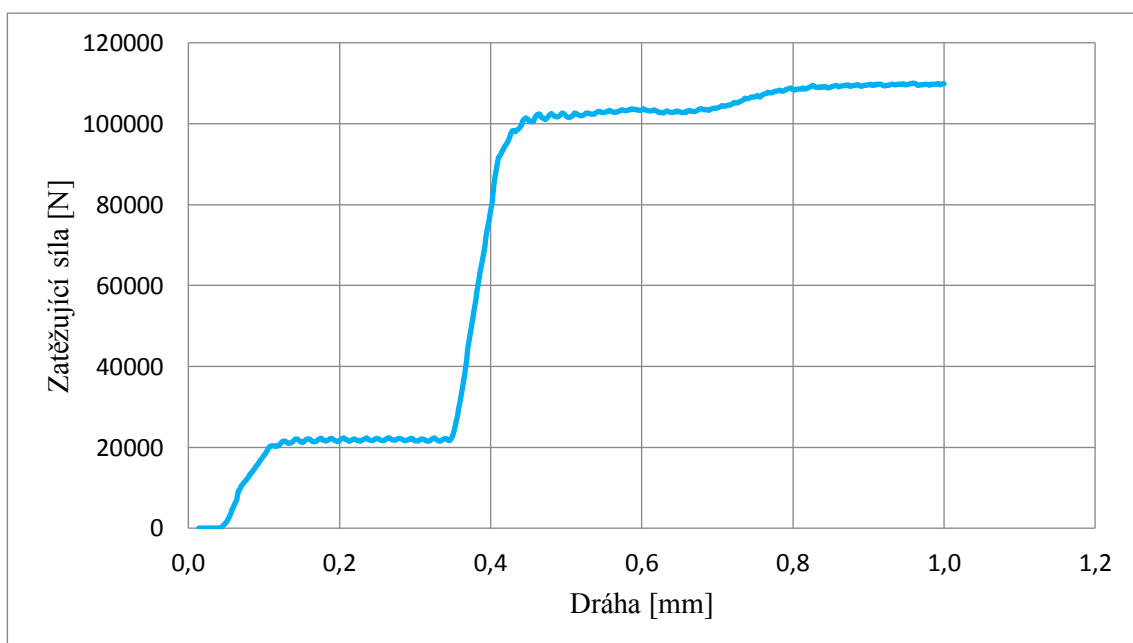
V grafu na obr. 64 je vidět srovnání výsledků síly na dráze skutečného praktického experimentu s výsledky numerické simulace. Pro toto srovnání bylo použito kontinuální zavádění do obou průvlaků. Pro tento experiment byl použit drát o délce 100 mm a stejně tak i pro simulaci. Z grafu je patrné, že simulace téměř odpovídá skutečnému experimentu. U druhého průvlatu dochází k odlišnostem v zjištěné síle mezi experimentem a simulací. Tato skutečnost je dána složitostmi při řešení kontaktů mezi drátem a průvlakem. Pro menší rozkmit by bylo nutné použití jemnější sítě a jemnějšího kroku simulace.



Obr. 64 Srovnání experimentu se simulací

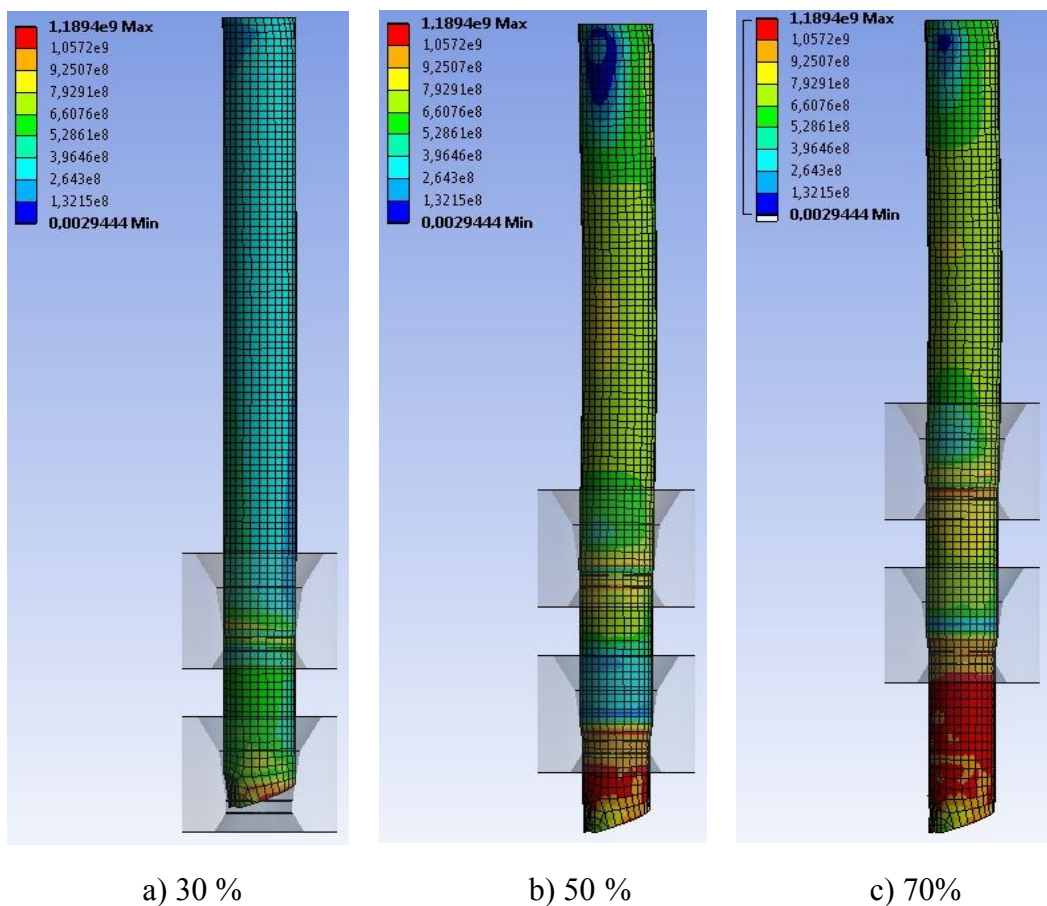
Simulace počítá s ideálním tělesem za ideálních podmínek, takže se předpokládá, že délka drátu při simulování bude delší než při skutečném experimentu. Při simulování byla zkoumána délka drátu v rozmezí mezi 160 až 170 mm. Jako mezní se ukázala délka drátu 164 mm. Při této délce drátu nebyl program schopen určit výsledek simulace z důvodu chyby výpočtu. Proto byly blíže zkoumány vzorky délky 163 a 165 mm.

Na obr. 65 jsou vidět výsledky simulace drátu o délce 163 mm. Z grafu je patrné, že drát projde přes oba průvlastky, tudíž nedošlo k jeho vybočení a ztrátě vzpěrné stability.

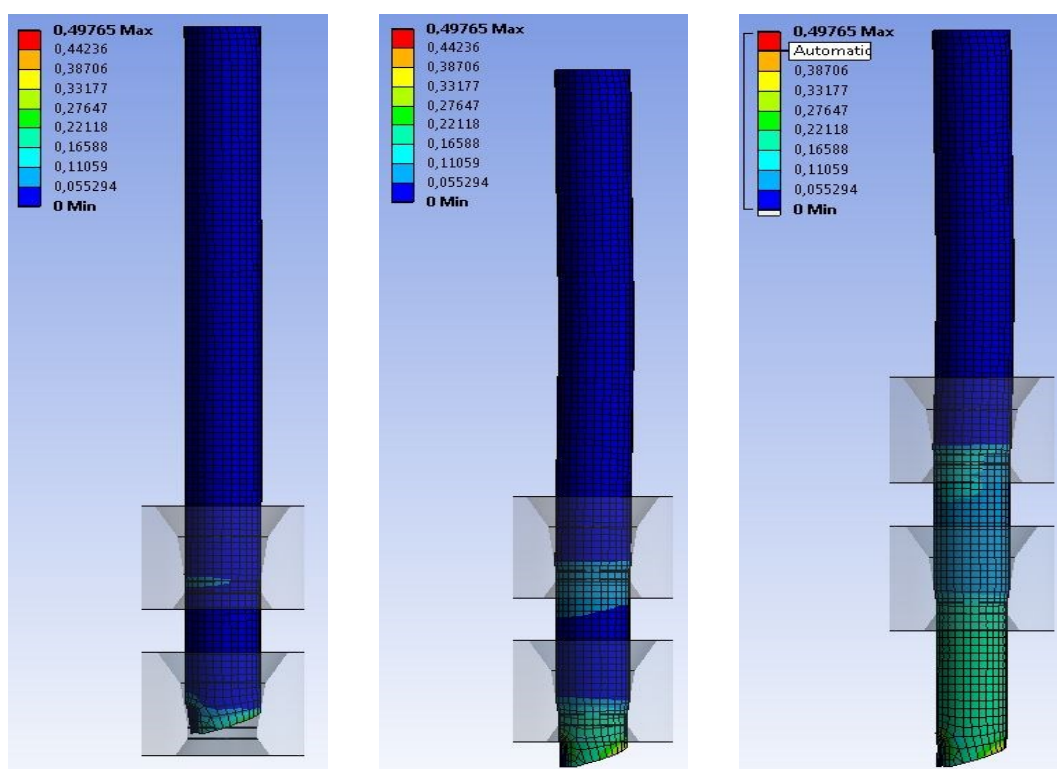


Obr. 65 Závislost síly na dráze (drát 163 mm)

Tomuto grafu odpovídají snímky ze simulace na následujících obrázcích. Na obr. 66 je vidět rozložení efektivního napětí v průběhu a) 30 %, b) 50 %, c) 70 % simulace na drátu délky 163 mm během protlačování. Na dalším obr. 67 je znázorněna plastická deformace v průběhu a) 30 %, b) 50 %, c) 70% simulace. Následující obr. 68 znázorňuje elastickou deformaci opět ve a) 30 %, b) 50 %, 70 % výsledku simulace.

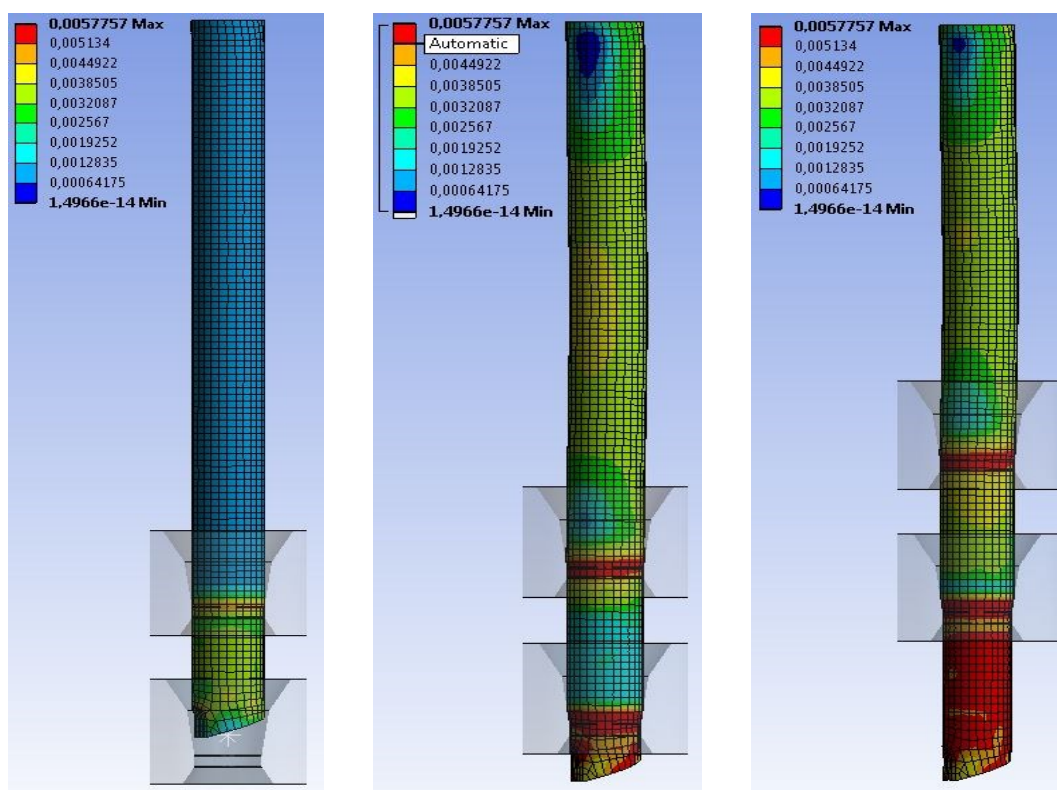


Obr. 66 Rozložení efektivního napětí ve tvářeném drátu délky 163 mm



a) 30 % b) 50 % c) 70%

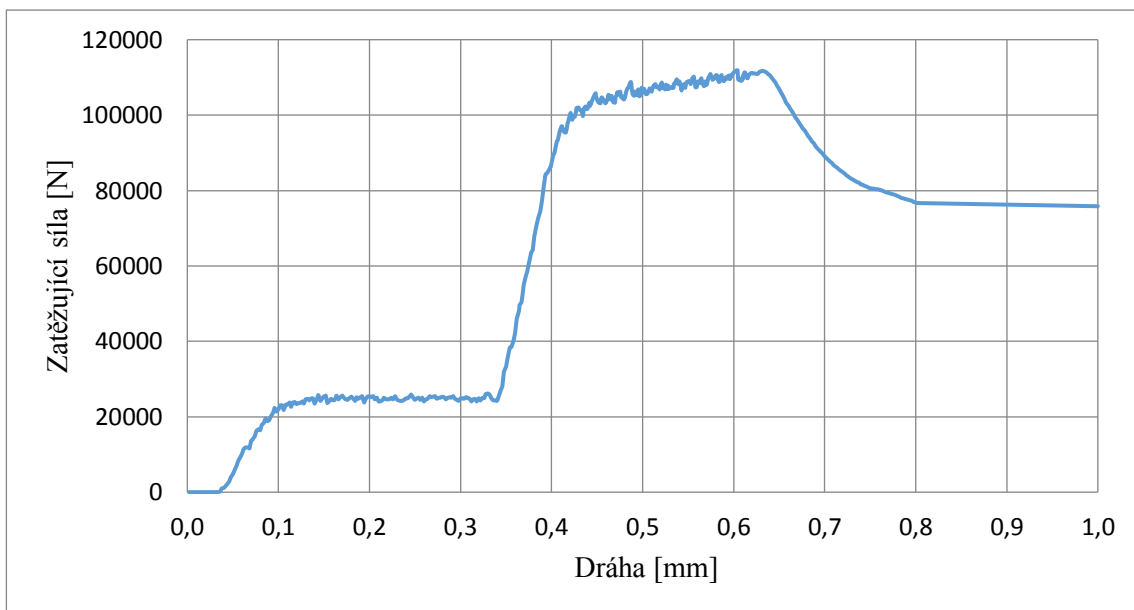
Obr. 67 Průběh plastické deformace ve tvářeném drátu délky 163 mm



a) 30 % b) 50 % c) 70%

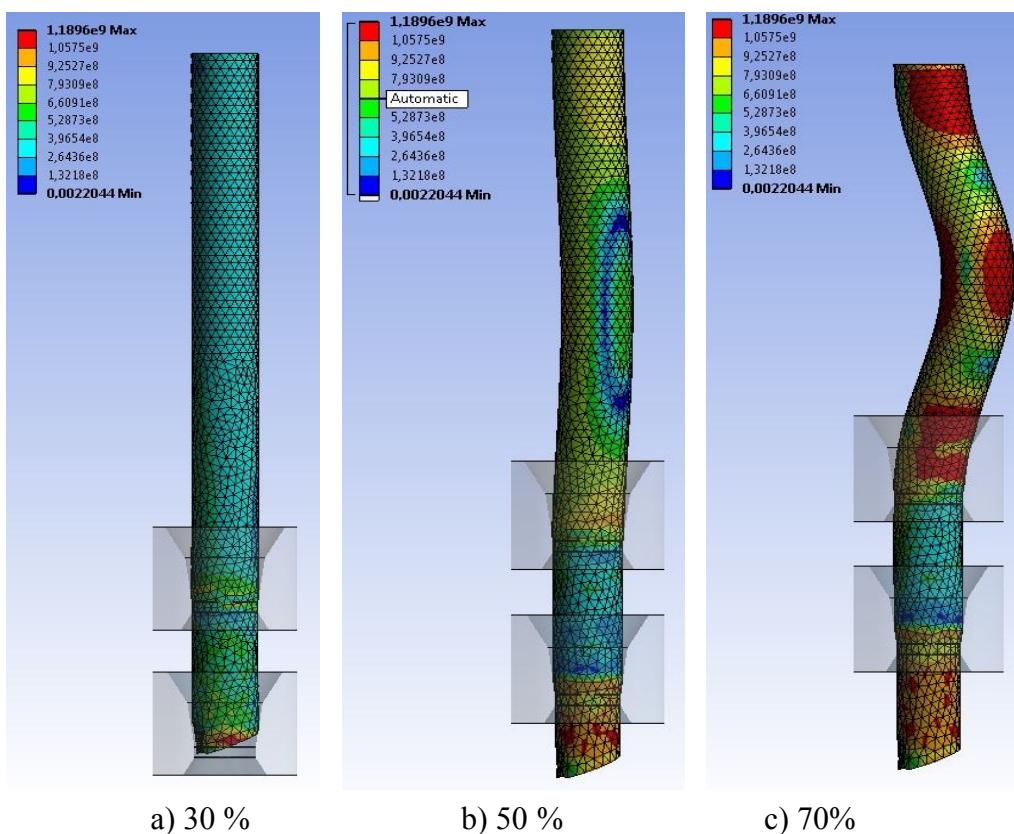
Obr. 68 Průběh elastické deformace ve tvářeném drátu délky 163 mm

Na dalším obr. 69 je vidět výsledek simulace v grafu síly na dráze drátu délky 165 mm. Z grafu je patrné, že tlačná síla poklesla, což znamená, že došlo k vybočení a ohnutí drátu.

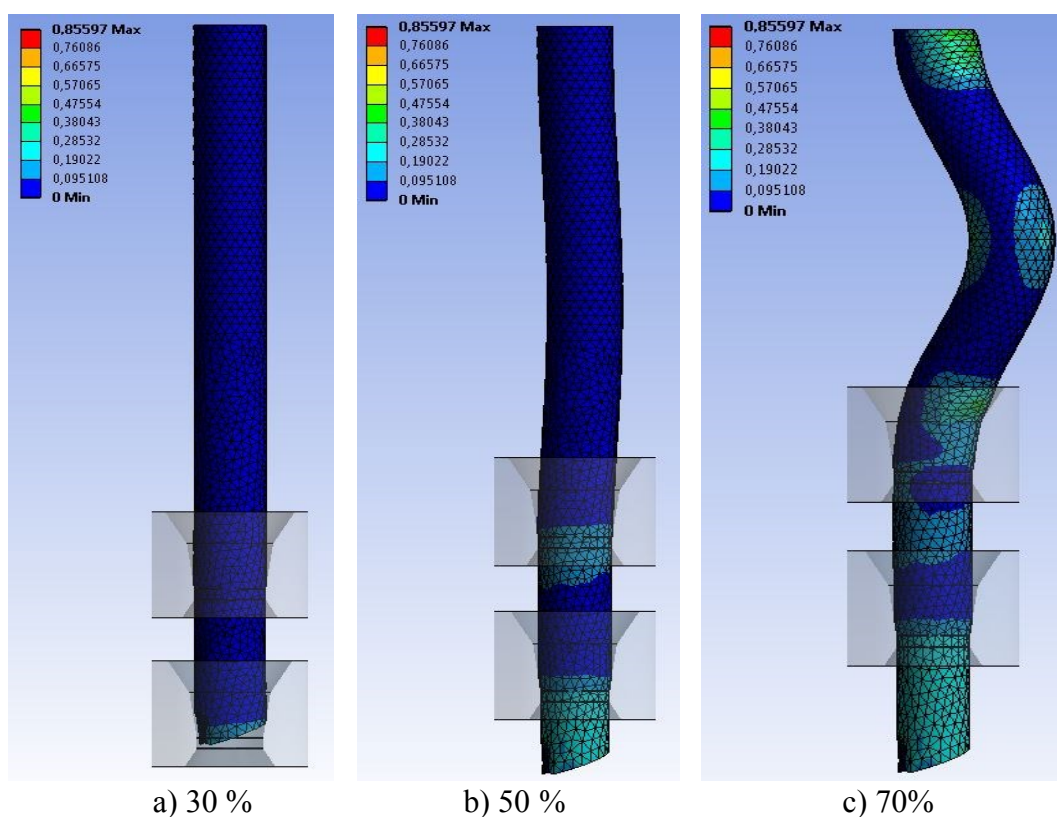


Obr. 69 Závislost síly na dráze (drát 165 mm)

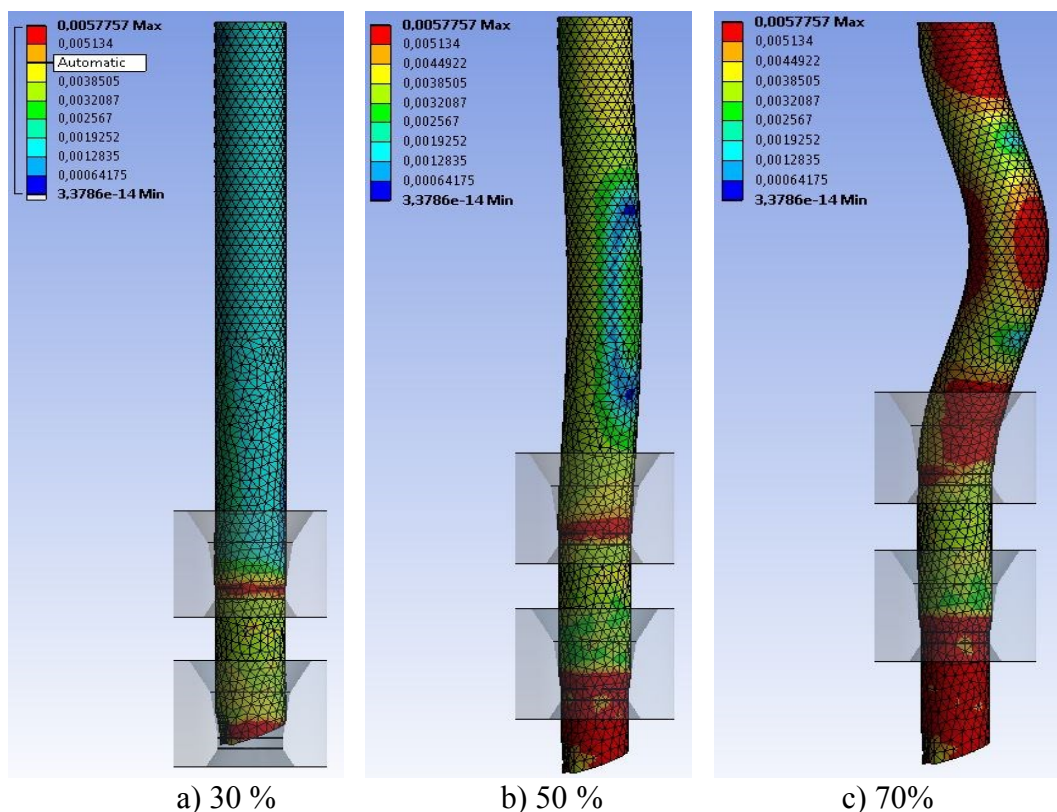
Tomuto grafu odpovídají snímky ze simulace na následujících obrázcích. Na obr. 70 je vidět rozložení efektivního napětí v průběhu a) 30 %, b) 50 %, c) 70 % simulace na drátu délky 163 mm během protlačování. Na dalším obr. 71 je znázorněna plastická deformace v průběhu a) 30 %, b) 50 %, c) 70% simulace. Následující obr. 72 znázorňuje elastickou deformaci v a) 30 %, b) 50 %, 70 % výsledku simulace.



Obr. 70 Rozložení efektivního napětí ve tvářeném drátu délky 165 mm



Obr. 71 Průběh plastické deformace ve tvářeném drátu délky 165 mm



Obr. 72 Průběh elastické deformace ve tvářeném drátu délky 165 mm

Ze simulace je zřejmé, že při ideálních podmínkách lze protlačovat drát o délce cca 10 mm větší, než ukázal experiment. Tato skutečnost platí pro ideální stav, který v praxi téměř nikdy nenastane. Z tohoto důvodu odpovídá skutečnost více experimentu než simulaci.

6 ZÁVĚRY

Na základě dodaných dokumentů bylo navrženo řešení pro daný problém, který se týká zavádění drátu do tažného zařízení Schumag. Pro řešení konkrétního problému, zavádění drátu do dvojitého průvlastku, byl vytvořen 3D model přípravku, který byl schopen demonstrovat skutečné problémy, které nastávají při zavádění drátu do tažného zařízení. Přípravek byl navržen pro dva průvlastky s možností měnit vzdálenost jak mezi jednotlivými průvlastky, tak mezi prvním průvlastkem a zaváděcími čelistmi. Tato vzdálenost byla regulována pomocí distančních kroužků, které bylo možno umístit jak pod průvlastky, tak mezi ně. Na základě tohoto 3D modelu byl následně přípravek vyroben a použit pro samotné zkoumání.

Experimenty byly provedeny na zkušebním zařízení ZD 40. Toto zařízení bylo použito jak pro pěchovací, tak i tahovou zkoušku. Vlastní experiment zavádění drátu do průvlastků byl proveden také na tomto zařízení. Pro tahovou zkoušku byly použity vzorky drátů z materiálu CK 67 o průměrech 14 mm a 12,88 mm. Drát o průměru 14 mm je výchozím drátem pro proces tažení. Drát průměru 12 mm je výsledný průměr drátu po procesu tažení. Pro pěchovací zkoušku byly vyrobeny vzorky z výchozího materiálu před tažením. Výsledky mechanických zkoušek těchto vzorků byly následně použity pro nastavení numerické simulace.

Pro zkoumání vlastního problému zavádění drátů byl použit vyrobený přípravek. S tímto zařízením byly zkoušeny různé délky drátů při různých režimech zavádění. Z tohoto experimentu bylo zjištěno, že je možné zavádět dráty o průměru 14 mm z materiálu CK 67 bez problémů do délky 135 mm. Dále bylo ověřeno, že nad délkou 155 mm dojde k vybočení a ztrátě vzpěrné stability drátu. Při délkách drátu 135 mm až 155 mm není výsledek zcela jasný. Na zavádění drátu působí různé vlivy, např. geometrie zastřiženého konce, průhyb drátu po průchodu rovnacím rolnami, mazání atd.

Dále byla na základě dodané výkresové dokumentace průvlastků a zjištěných mechanických vlastností materiálu při předchozích zkouškách vytvořena numerická simulace. V simulaci byl pro ověření vytvořen model drátu, který byl zkoušen na tažném zařízení ZD 40 pro porovnání výsledků simulace a skutečného experimentu. Tento výsledek byl téměř shodný. Následně byla vytvořena simulace pro zkoušení protlačení délek drátu od 160 mm do 170 mm. Z těchto simulací bylo zjištěno, že mezní délka únosnosti drátu za ideálního stavu je 164 mm.

Ze souhrnu výsledků vyplývá, že je možné zavádět dráty z materiálu CK 67, průměru 14 mm volné délky drátu do 135 mm. Vzhledem k tomu, že čelisti při zavádění dovolují pohyb od 70 mm do 300 mm je nutné omezit jejich vzdálenost na maximálně 135 mm od průvlastku. Dosažení těchto parametrů je možné buď konstrukční úpravou nebo nastavením koncových snímačů pojezdu čelistí na maximální vzdálenost 135 mm od průvlastku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [25]

1. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.
2. LENFELD, Petr. Technologie objemového tváření: tažení drátů a profilů. *Technická univerzita Liberec: Katedra strojírenské technologie oddělení tváření kovů a plastů* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/04.htm#042
3. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
4. TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes - machines - tools*. New York: Springer-Verlag, c2006. ISBN ISBN978-3-540-33216-9.
5. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN ISBN978-1-107-00452-8.
6. ASM INTERNATIONAL: *Metals handbook volume 14: Forming and forging*. 9. Metals Park, Ohion: American Socceity for Metals, 1998. ISBN 978-0-871-70020-9.
7. GROOVER, Mikell P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 4th ed. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2010. Informace a dokumentace, 3297 (01 0187). ISBN 978-0470467008.
8. FABÍK, Richard. *Tváření kovů: učební text : studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012 [cit. 2019-05-16]. ISBN ISBN978-80-248-2572-4.
9. KORECKÝ, Jan. *Tažený ocelový drát: Jeho výroba a zpracování*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
10. *Metal forming handbook*. New York: Springer-Verlag, c1998. ISBN 35-406-1185-1.
11. POČTA, Bohumil. *Základy teorie tváření kovů*. 1. Praha: SNTL-NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1966.
12. PEŠINA, Eugen. *Základy užité teorie plasticity*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966.
13. *Theory of Wiredrawing*. [online]. Mexico City [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.antaac.org.mx/assets/10.-theory-of-wiredrawing.pdf>
14. *Wire drawing* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.wirecable.in/2015/04/dies-management-in-wire-drawing-industry/>
15. Wire drawing. In: *Uomustansiriyah* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2016_04_18!11_56_42_AM.pdf

16. Metal Drawing. *The library of manufacturing* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: http://thelibraryofmanufacturing.com/metal_drawing.html
17. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN ISBN978-80-214-4747-9.
18. Problematika tvařitelnosti mikrolegované šroubové oceli. *METAL* [online]. 2002, 2002, , 8 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2002/sbornik/papers/165.pdf>
19. FABÍK, Richard. *Modelování tvářecích procesů* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-15]. ISBN ISBN 978-80-248-3362-0. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/14_Modelovani_tvarecich_procesu/Fabik_Modelovani_tvarecich_procesu.pdf
20. LOGAN, Daryl L. *A first course in the finite element method*. 4th ed. United States: Thomson, c2007. ISBN 05-345-5298-6.
21. ŘIHÁČEK, Jan. *Počítačová podpora technologie* [online]. Brno, 2015 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/studium/index.php?stranka=opory>
22. SADÍLEK, Marek. *Počítačová podpora výroby* [online]. 1. Ostrava, 2011 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/Pocitacova-podpora-vyroby.pdf>
23. LEE, Huei-Huang. *Finite element simulations with ANSYS workbench 14: [theory, applications, case studies]*. Mission: SDC Publications, 2012. ISBN 978-1-58503-725-4.
24. DROZDA, Jiří. *Příručka ANSYS Workbench*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05175-7.
25. *CITACE PRO* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/>
26. *Total materia* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://search.totalmateria.com/MaterialDetails/MaterialDetail?vkKey=1045596&keyNum=603&type=3&hs=0>
27. TSCHAETSCH, Heinz. *Metal Forming Practise* [online]. 2006. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006 [cit. 2019-05-13]. ISBN ISBN-10 3-540-33216-2. Dostupné z: <https://epdf.tips/metal-forming-practise.html>
28. *Pružina vinutá* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.broukservis.cz/vw-transporter-t-4-1990-03-tlumice-dily-shock-absorbers-springs-c4193/pruzina-vinuta-hd-zadni-typ-4-1990-i29110/>
29. *Ocelové lano* [online]. In: . [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://velkoobchod.conrad.cz/ocelove-lano-dratove-toolcraft-486775--x-d-4-mm-x-1-m-seda.k486775>
30. *Tažná stolice Schumag* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/schumag-kzrp-2b-p60222034/#prettyPhoto>

31. *Hrotovací zařízení* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.aramakina.com/tel-uc-acma-makinesi.php>
32. *Kartáčovací zařízení* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/bar-descaling-machine-4963414630.html>
33. *Metací kolo* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.trytech.cz/o-tryskani/tryskani-metacimi-koly/>
34. *Drátotah* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://gcreurodraw.com/wet-drawing-machines>
35. *Odvlíjecí zařízení* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/104523/STU080_FMMI_B2109_2109R034_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=n
36. *Hrotovací zařízení* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://cz.lgix-rollingmill.com/pointing-machine/new-type-automatic-swing-coil-pointing.html?fbclid=IwAR0jypxhdXp6DsUno3DOGe5VrbT6gsh4oF1wt86z9dh0TukiaxMGMOEs87E>
37. *Hrotovací zařízení* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.vaspo.cz/cz/vyroba-stroje/stroje-pro-dratovny/draty-ostatni/item/195-hrotovacka-h-02.html?fbclid=IwAR0AvOs-wx1OY2w9YpM-xk-L4upscKQtH5R5fxVWgDIbyB9A6kiPpNXnHhM#popis-produktu>
38. *Rovnačky drátu* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.pabohemia.cz/website/mainmenu/webpage/wire/>
39. *Stroje pro výrobu drátů*. In: *Vaspo* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.vaspo.cz/cz/>
40. *Tažné průvlaky* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.estevesgroup.com/products/wire-drawing-dies/nd-drawing-dies>
41. *Brusné jehly* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.mgdies.com/prodotti-filiera-e-articoli-per-trafilatura-wire-drawing-dies/prodotti-per-la-lavorazione-di-filiere-dies-grinfinf-process-products/>
42. *Ocelový drát* [online]. In: . [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.tritreg.cz/tazene-draty-zihane/ocelovy-drat-cerne-zihany/>
43. *Ansys* [online]. In: . [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwjfgpO_wKriAhUG_KQKHboKCXEQjRx6BAGBEAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DImQ7SzhZB1U&psig=AOvVaw0e64x99mhqL6KTV0L3eiPe&ust=1558455272190940

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
1D	Jednorozměrný prutový prvek	
2D	Dvojměrný plošný prvek	
3D	Trojměrný prostorový prvek	
A	Tažnost	[%]
d ₀	Vstupní průměr drátu	[mm]
d ₁	Výstupní průměr drátu	[mm]
d _N	Elementární tlaková napětí	[MPa]
d _T	Elementární třecí síly	[MPa]
dx	Nekonečně malá tloušťka elementu	[mm]
d _{el}	Poměrná deformace ve směru prodlužování elementární částice	[-]
d _{er}	Poměrná deformace částice v radiálním směru	[-]
d _{et}	Poměrná deformace částice v tečném směru	[-]
E	Modul pružnosti v tahu	[GPa]
F	Zatěžující síla	[N]
J _{min}	Kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
l	Délka průvlaku	[mm]
ln	Skutečná logaritmická deformace	[-]
Ln	Délka drátu v průvlacích	[mm]
MKD	Přírodní monokrystalický diamant	
PKD	Polykrystalický diamant	
q	Teplo	[J]
Q	Přítlačná síla	[F]
R	Smluvní napětí	[MPa]
R _m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _{ms}	Střední mez pevnosti drátu v tahu	[MPa]
R _{p02}	Smluvní mez pevnosti v tahu	[MPa]
S _n	Průřez v n-tém průvlaku	[mm]
TKP	Tvrdokovový průvlak	
V	Objem drátu	[mm ³]
v	Rychlost drátu v průvlacích	[m/s]
W	Přetvárná práce	[J·10 ⁻³]
Z	Zúžení	[%]
2α	Úhel části průvlaku	[°]
γ _s	Účinnost přetvárné síly	[%]
Ø	Průměr drátu	[mm]
μ	Koeficient tření	[-]
ε	Poměrné prodloužení	[-]
ρ	Dílčí úběr	[-]
σ	Napětí	[MPa]
σ _n	Normálové napětí	[MPa]
τ	Tečné napětí	[MPa]
φ	Logaritmické přetvoření	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Produkty tažení drátu [28]	10
Obr. 2 Drátotah Schumag [30]	11
Obr. 3 Zaváděcí čelisti	11
Obr. 4 Hrotovací zařízení	12
Obr. 5 Nákres tažného procesu [4]	13
Obr. 6 Průvlak – rozložení sil [8]	14
Obr. 7 Podstata tažení v průvlaku [8]	15
Obr. 8 Intenzita deformace při tažení [11]	16
Obr. 9 Martenzitická struktura [8]	19
Obr. 10 Odokujování kartáčováním [32]	23
Obr. 11 Odokujování tryskáním [33]	24
Obr. 12 Otryskávání drátu v žíle [8]	24
Obr. 13 Schematické rozdělení drátotahů	25
Obr. 14 Akumulační drátotahy [8]	25
Obr. 15 Princip vedení drátu na přímotažném drátotahu	26
Obr. 16 Princip vedení drátu-drátotahu s V drážkou [8]	26
Obr. 17 Princip vedení drátu na drátotahu pracujícím se skluzem [8]	27
Obr. 18 Stupňovitý drátotah [34]	27
Obr. 19 Průvlaková skříňka se zásobníkem práškového maziva	28
Obr. 20 Průvlaková skříňka se zásobníkem maziva [35]	28
Obr. 21 Hrotovací zařízení [36]	28
Obr. 22 Rovnačka drátu [38]	29
Obr. 23 Horizontální odvíjedlo [35]	29
Obr. 24 Rotační odvíjedlo [8]	30
Obr. 25 Stacionární odvíjedlo s axiálním odvíjením drátu přes hlavu [8]	30
Obr. 26 Navíjení na cívku	30
Obr. 27 Navíjení do svitku [39]	30
Obr. 28 Horizontální navíjecí zařízení [39]	31
Obr. 29 Vertikální navíjecí zařízení [39]	31
Obr. 30 Navíjecí kotouč [8]	31
Obr. 31 Zatahovací kleště [35]	32
Obr. 32 Zatahovací přípravek pro velké průměry drátů	32
Obr. 33 Schéma průvlaku [8]	33
Obr. 34 PKD průvlaky [40]	33
Obr. 35 MKD průvlaky [40]	34
Obr. 36 TKP průvlaky [40]	34
Obr. 37 Brusné jehly [41]	36
Obr. 38 Technologie broušení průvlaků [8]	36
Obr. 39 Základní typy prvků [21]	38
Obr. 40 Závislost počtu prvků na dosažené přesnosti [21]	38
Obr. 41 Prostředí simulačního programu Ansys [43]	39
Obr. 42 Drátotah [30]	40
Obr. 43 Přípravek pro uložení dvou průvlaků do drátotahu	40
Obr. 44 Vzdálenost mezi čelistí a průvlakem	41
Obr. 45 Napěchovaný drát	41
Obr. 46 Zkušební stroj ZD 40	42
Obr. 47 Přetržené vzorky	43
Obr. 48 Graf závislosti smluvního napětí na poměrném prodloužení	43

Obr. 49 Spěchované vzorky	44
Obr. 50 Křivky zpevnění jednotlivých vzorků	45
Obr. 51 Průměrná křivka zpevnění	45
Obr. 52 Typy uložení	46
Obr. 53 Model přípravku	48
Obr. 54 Demonstrační přípravek	49
Obr. 55 Zavádění drátu do průvlaků	50
Obr. 56 Závislost síly na dráze při zavádění drátu s vedením	51
Obr. 57 Zavedený drát do průvlaků	51
Obr. 58 Závislost síly na dráze při zavádění drátu s přerušováním	52
Obr. 59 Závislost síly na dráze při zavádění drátu bez vedení	53
Obr. 60 Závislost síly na dráze při zavádění drátu bez vedení	53
Obr. 61 Protlačovací zkouška	54
Obr. 62 Konce drátu po odstřížení	55
Obr. 63 Geometrický model simulace	55
Obr. 64 Srovnání experimentu se simulací	56
Obr. 65 Závislost síly na dráze (drát 163 mm)	56
Obr. 66 Rozložení efektivního napětí ve tvářeném drátu délky 163 mm	57
Obr. 67 Průběh plastické deformace ve tvářeném drátu délky 163 mm	58
Obr. 68 Průběh elastické deformace ve tvářeném drátu délky 163 mm	58
Obr. 69 Závislost síly na dráze (drát 165 mm)	59
Obr. 70 Rozložení efektivního napětí ve tvářeném drátu délky 165 mm	59
Obr. 71 Průběh plastické deformace ve tvářeném drátu délky 165 mm	60
Obr. 72 Průběh elastické deformace ve tvářeném drátu délky 165 mm	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení materiálu Ck67 [26]	11
Tab. 2 Doporučená rychlost závislosti na mezi pevnosti v tahu [4].	21
Tab. 3 Chemické složení a vlastnosti jádra průvlaků [8]	34
Tab. 4 Naměřené hodnoty tahové zkoušky	44

SEZNAM VÝKRESŮ

Přípravek	DP - 01 - A4-162621-2019-DP
Kusovník	DP - 02 - A4-162621-2019-1/1-DP
Tubus	DP - 03 - A4-162621-1
Víčko tubusu	DP - 04 - A4-162621-2
Vložka	DP - 05 - A4-162621-3
Vodící pouzdro	DP - 06 - A4-162621-4
Víčko	DP - 07 - A4-162621-5
Distanční kroužek	DP - 08 - A4-162621-6